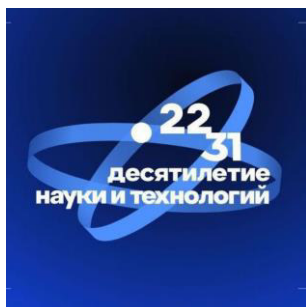




ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ СОВРЕМЕННЫХ ПРОИЗВОДСТВ

VII Всероссийская научно-практическая конференция

Сборник статей



ПЕНЗА 2026

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ФГУП «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЭЛЕКТРОННО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ»
ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР ПГАУ

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ СОВРЕМЕННЫХ ПРОИЗВОДСТВ

**Сборник статей
VII Всероссийской
научно-практической конференции**

14-15 мая 2026 г.

**Пенза
ПГАУ
2026**

УДК 62+33
ББК 3+39
Т38

Под научной редакцией:

доктора технических наук, профессора, *В.А. Скрыбина*,
доктора технических наук, доцента *А.Е. Зверовщикова*

Техника и технология современных производств: сборник статей VII Всероссийской научно-практической конференции / Пензенский государственный университет [и др.]; под ред. Скрыбина В.А., Зверовщикова А.Е. – Пенза: 482 с. – URL: https://mnic.pgau.ru/file/doc/konferencii/2026/Сборник_ВК-18-26.pdf. – Текст: электронный.

ISBN 978-5-00196-436-0

В сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции «Техника и технология современных производств» включены результаты теоретических и экспериментальных исследований ученых, преподавателей высших учебных заведений, аспирантов, магистрантов и студентов, посвященных развитию техники и технологии современных инновационных производств.

The collection of materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference «Technology and technology of modern industries» includes the results of theoretical and experimental research by scientists, teachers of higher educational institutions, graduate students, undergraduates and students devoted to the development of technology and technology of modern innovative industries.

УДК 62+33
ББК 3+39

ISBN 978-5-00196-436-0

© МНИЦ ПГАУ, 2026

ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 0,4-6 (10) кВ

М.М. Агазуллин, О.Е. Куракина

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

В статье рассматриваются проблемы потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях напряжением 0,4–6(10) кВ. Проанализирована структура потерь, включающая техническую (нагрузочные потери в линиях и трансформаторах, потери холостого хода) и коммерческую составляющие. Приведена классификация методов расчета потерь – от метода средних нагрузок до поэлементного расчета – с указанием классов точности и областей применения. Выявлены основные факторы, влияющие на уровень потерь: конфигурация сети, несимметрия нагрузок, качество электроэнергии. Систематизированы организационно-технические мероприятия по снижению потерь, включая оптимизацию режимов работы трансформаторов, выравнивание нагрузок фаз, повышение коэффициента мощности и внедрение автоматизированных систем учета. Сделан вывод о необходимости системного подхода к управлению потерями в распределительных сетях.

Ключевые слова: *потери электроэнергии, распределительные сети, коммерческие потери, нагрузочные потери, потери холостого хода, методы расчета, несимметрия нагрузок, коэффициент мощности, компенсация реактивной мощности, АСКУЭ.*

Потери электроэнергии в распределительных сетях являются одной из ключевых проблем современной электроэнергетики, оказывающей непосредственное влияние на экономическую эффективность энергоснабжающих организаций и конечную стоимость электроэнергии для потребителей. Наибольший удельный вес в структуре потерь приходится на распределительные сети напряжением 0,4–6(10) кВ, что обусловлено их протяженностью, разветвленностью и большим количеством элементов – трансформаторных подстанций, линий электропередачи, коммутационной аппаратуры. Понимание природы возникновения потерь, методов их расчета и способов минимизации является необходимым условием для повышения эффективности функционирования систем электроснабжения.

Общие потери электроэнергии в распределительных сетях принято разделять на две основные составляющие: технические (технологические) и коммерческие. Технические потери обусловлены физическими процессами, происходящими при передаче и распределении электроэнергии, и включают потери в линиях электропередачи (нагрев проводов), потери в трансформаторах (потери в стали и меди), а также потери в изоляции и на

корону. Коммерческие потери связаны с погрешностями приборов учета, хищениями электроэнергии и ошибками в определении объемов отпуска.

В распределительных сетях 0,4–6(10) кВ наибольший удельный вес в структуре технических потерь занимают нагрузочные потери – то есть потери, зависящие от величины передаваемой мощности. Они включают потери в проводах линий электропередачи ($\Delta W_{\text{л}}$) и потери в обмотках трансформаторов ($\Delta W_{\text{тр}}$). Постоянная составляющая потеря, не зависящая от нагрузки (потери холостого хода трансформаторов, потери в изоляции), также присутствует, но ее доля значительно меньше.

Расчет потерь электроэнергии в распределительных сетях регламентируется специальными методическими документами. В зависимости от целей и доступной исходной информации применяются различные методы расчета, характеризующиеся разными классами точности. В таблице 1 представлена сводная характеристика основных методов.

Таблица 1 – Методы расчета потерь электроэнергии в распределительных сетях 0,4–6(10) кВ.

Метод расчета	Класс точности (для одного элемента)	Исходные данные	Область применения
Метод средних нагрузок	25% (для фидера 6–20 кВ)	Суточные графики тока нагрузки и напряжения на шинах ЦП	Сети 6–20 кВ
Метод оценки на основе обобщенной информации	40% (для линии 0,4 кВ)	Типовые схемы сетей, обобщенные данные о нагрузках	Сети 0,4 кВ
Позлементный метод	Наивысший (5–10%)	Данные контрольных замеров в зимний максимум и летний минимум	Все типы сетей при наличии данных
Метод характерных суток	10–15%	Дискретные значения нагрузки через равные интервалы	Сети с повторяющимися графиками нагрузки
Метод числа часов наибольших потерь	15–20%	Максимальная нагрузка, число часов использования максимума	Предварительные (оценочные) расчеты

Таблица 2 – Преимущества и недостатки методов расчета потерь электроэнергии

Преимущества	Недостатки
Относительная простота, приемлемая точность	Не учитывает неравномерность нагрузки внутри периода
Не требует детальных замеров на каждой линии	Низкая точность для отдельных линий
Наиболее точный, позволяет выявить узкие места	Трудоемкость, необходимость проведения замеров
Учитывает неравномерность нагрузки по времени	Требует представительных графиков нагрузки
Простота, минимальный объем исходных данных	Низкая точность, не учитывает форму графика

Комплекс мероприятий по снижению потерь включает в себя следующие основные направления.

- Оптимизация режимов работы трансформаторов.
- Выравнивание нагрузок фаз.
- Повышение коэффициента мощности.
- Внедрение систем автоматизированного учета (АСКУЭ).

На двухтрансформаторных подстанциях при сезонном снижении нагрузок целесообразно отключать один из трансформаторов, что позволяет исключить потери холостого хода отключаемого трансформатора.

В сетях 0,4 кВ несимметрия токов по фазам является одним из наиболее значимых факторов увеличения потерь. Регулярные замеры и перераспределение однофазных нагрузок между фазами позволяют снизить потери на 10–15%.

Установка компенсирующих устройств (конденсаторных батарей, синхронных компенсаторов) вблизи потребителей снижает реактивную составляющую тока и уменьшает потери в линиях и трансформаторах.

Современные системы учета позволяют оперативно получать информацию о нагрузках, выявлять участки с повышенными потерями и принимать своевременные меры по их снижению.

Потери электроэнергии в распределительных сетях 0,4–6(10) кВ являются неизбежным следствием передачи и распределения электроэнергии, но их уровень может и должен контролироваться. Системный подход, включающий регулярные расчеты потерь с применением утвержденных методик, анализ структуры потерь, внедрение организационно-технических мероприятий по снижению потерь и использование современных программных комплексов и средств учета, позволяет достичь значительного экономического эффекта. Особое внимание следует уделять сетям 0,4 кВ, где потери часто достигают максимальных значений из-за несимметрии нагрузок и большого количества однофазных потребителей.

Список использованных источников

1. ГОСТ Р 52565-2006 – Выключатели переменного тока на напряжения от 3 до 750 кВ. Общие технические условия. – Москва: Стандартинформ, 2007. – 42 с.
2. СО 153-34.20.523-2005 – Методические рекомендации по определению потерь электрической энергии в городских электрических сетях напряжением 10(6)-0,4 кВ / Госстрой России. – Москва: Издательство Минэнерго, 2005. – 98 с.
3. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей – Москва: Издательство НЦ ЭНАС, 2020. – 264 с.
4. Ефимова, Н.Ю. Модернизация методов постатейного анализа очагов потерь мощности в распределительных сетях 10/6/0,4 кВ / Н.Ю. Ефимова, Г.А. Мальцев // Energy Systems Research. – 2022. – Т. 5, № 4. – С. 27–35.
5. Хомутов, С.О. Сравнительный анализ структуры потерь электрической энергии в распределительном сетевом комплексе России / С.О. Хомутов, И.В. Белицын, А. С. Сабельников // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2025. – № 2 (244). – С. 92–98. – DOI: 10.53083/1996-4277-2025-244-2-92-98.

POWER LOSSES IN DISTRIBUTION NETWORKS 0.4–6 (10) KV

M.M. Agazullin, O.E. Kurakina

*Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia*

The article addresses the problems of electricity losses in distribution networks with voltage levels of 0.4–6(10) kV. The structure of losses is analyzed, including technical components (load losses in lines and transformers, no-load losses) and commercial losses. A classification of loss calculation methods – from the average load method to element-by-element calculation – is presented, along with accuracy classes and application areas. The main factors influencing loss levels are identified: network configuration, load unbalance, and power quality. Organizational and technical measures for loss reduction are systematized, including optimization of transformer operation modes, phase load balancing, power factor improvement, and implementation of automated metering systems. It is concluded that a systematic approach to loss management in distribution networks is necessary.

Keywords: *electricity losses, distribution networks, commercial losses, load losses, no-load losses, calculation methods, load unbalance, power factor, reactive power compensation, AMR (Automated Meter Reading).*

УДК 621.311.1

РАЗРАБОТКА НОВОЙ СТРУКТУРЫ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ 6 КВ

M.M. Агазуллин, О.Е. Куракина

*Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия*

В статье рассматриваются вопросы совершенствования структуры распределительных электрических сетей напряжением 6 кВ промышленных систем электроснабжения. Анализируются недостатки традиционных радиальных и магистральных схем, выявляются основные проблемы эксплуатации – низкая надежность, высокие потери электроэнергии, недостаточная гибкость при изменениях технологических процессов. Предлагается новая структура распределительной сети на основе принципов секционирования, резервирования и применения современных коммутационных аппаратов с дистанционным управлением. Обосновываются технические и экономические преимущества предлагаемой структуры, включая повышение надежности электроснабжения, снижение потерь электроэнергии и сокращение времени восстановления питания при аварийных отключениях.

Ключевые слова: *распределительная сеть, промышленное электроснабжение, 6 кВ, структура сети, радиальная схема, магистральная схема, секционирование, резервирование, надежность, потери электроэнергии.*

Системы электроснабжения промышленных предприятий представляют собой сложные распределительные сети, основу которых составляют сети напряжением 6 кВ. Этот класс напряжения является преобладающим для питания мощных электродвигателей (синхронных и асинхронных) напряжением 6 кВ, а также для распределения электроэнергии между цеховыми подстанциями 6/0,4 кВ. От рационального построения распределительной сети 6 кВ зависят надежность электроснабжения, технико-экономические показатели системы в целом, качество электроэнергии у потребителей и эксплуатационные затраты.

Традиционные подходы к построению распределительных сетей промышленных предприятий, заложенные в нормативных документах еще в советский период, не в полной мере отвечают современным требованиям. Рост энерговооруженности предприятий, внедрение энергоемких технологий, ужесточение требований к надежности электроснабжения и качества электроэнергии, а также необходимость оптимизации капитальных и эксплуатационных затрат диктуют необходимость поиска новых структурных решений.

Радиальные схемы являются наиболее простыми и распространенными для питания крупных сосредоточенных нагрузок – электродвигателей 6 кВ и трансформаторных подстанций 6/0,4 кВ большой мощности. При такой схеме от распределительного устройства (РУ) 6 кВ главной понижающей подстанции (ГПП) отходят отдельные кабельные или воздушные линии к каждому потребителю.

Преимущества радиальных схем: простота построения, наглядность, удобство эксплуатации, высокая селективность защит, минимальное влияние аварий на соседних присоединениях.

Недостатки: большое количество кабельных линий и ячеек в РУ, значительные капитальные затраты, низкая гибкость при изменении расположения нагрузок, отсутствие резервирования (при повреждении линии потребитель полностью теряет питание).

Магистральные схемы предполагают питание нескольких потребителей от одной линии (магистральной), к которой они подключаются через ответвительные пункты или распределительные пункты (РП). Такие схемы характерны для питания большого количества относительно небольших нагрузок, равномерно распределенных по территории предприятия.

Преимущества магистральных схем: экономия кабельной продукции и ячеек в РУ, возможность питания потребителей, расположенных в одном направлении, лучшая загрузка линий.

Недостатки: низкая надежность (повреждение магистрали приводит к отключению всех подключенных потребителей), сложность обеспечения селективности защит, необходимость в секционировании, ограничения по суммарной мощности присоединенных потребителей.

На практике наиболее распространены смешанные схемы, в которых наиболее ответственные потребители получают питание по радиальным

линиям, а менее ответственные – по магистральным с возможностью секционирования и резервирования.

Анализ эксплуатации распределительных сетей 6 кВ промышленных предприятий позволяет выделить следующие системные проблемы:

- Низкая надежность магистральных участков.
- Сложность обеспечения селективности.
- Отсутствие гибкости.
- Высокие потери электроэнергии.
- Большое время локализации повреждения.

Повреждение любого элемента магистрали (кабеля, ответвления, концевого соединения) приводит к отключению всех потребителей, подключенных к данной магистрали. Время восстановления питания может составлять часы и даже сутки при повреждении кабеля.

При последовательном включении нескольких распределительных пунктов на одной магистрали максимальные токовые защиты требуют ступенчатой выдержки времени. Накопленная задержка может достигать 1,5–2 секунд, что часто превышает допустимые значения и ухудшает термическую стойкость оборудования.

Традиционные распределительные сети сложно адаптировать к изменениям технологического процесса – перемещению нагрузок, вводу новых мощностей, изменению категорийности потребителей.

При неоптимальном распределении нагрузок по фазам (для линий 0,4 кВ) и неоптимальной конфигурации сети могут возникать дополнительные потери.

При отсутствии средств телемеханики и автоматизации поиск места повреждения в разветвленной кабельной сети занимает значительное время.

Предлагаемая новая структура распределительной сети 6 кВ базируется на следующих основных принципах.

1. Магистральные линии 6 кВ должны быть разделены на участки с помощью секционирующих коммутационных аппаратов (выключателей нагрузки или вакуумных выключателей). Оптимальная длина секции – 3–5 присоединенных трансформаторных подстанций или 500–1000 метров кабельной линии. Секционирование позволяет при повреждении на одном участке отключить только этот участок, сохранив питание остальных.

2. Наиболее ответственные магистрали целесообразно выполнять в виде замкнутых (кольцевых) схем с нормально разомкнутым секционирующим выключателем в точке раздела. При этом каждая магистраль получает питание от двух независимых источников (разных секций шин ГПП или разных ГПП). В нормальном режиме секционирующий выключатель разомкнут, магистрали работают раздельно. При повреждении одного из вводов или участка магистрали разомкнутый выключатель замыкается, обеспечивая питание всех потребителей от исправного источника.

3. Для повышения оперативности управления сетью секционирующие выключатели и выключатели на вводах РП должны быть оснащены приводами с возможностью дистанционного управления от диспетчерского пункта или автоматики. Это позволяет в десятки раз сократить время восстановления питания после аварии.

4. В новой структуре предполагается внедрение систем автоматического секционирования и автоматического ввода резерва (АВР) на основе микропроцессорных терминалов. Такие системы способны самостоятельно локализовать поврежденный участок и переключить питание потребителей на резервный источник без участия персонала.

5. Сеть должна проектироваться как модульная, допускающая поэтапное расширение без коренной реконструкции существующих участков. Для этого целесообразно использовать унифицированные распределительные пункты с возможностью установки дополнительных ячеек и блоков секционирования.

Расчетные показатели надежности предлагаемой структуры по сравнению с традиционной магистральной представлены в Таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение показателей надежности

Показатель	Традиционная магистральная схема	Предлагаемая структура (с резервированием)
Параметр потока отказов (ω), 1/год	0,35	0,08
Среднее время восстановления (T_v), час	8,0	0,5
Коэффициент готовности (K_g)	0,99968	0,999995
Вероятность безотказной работы за год	0,704	0,923
Средняя недоотпущенная электроэнергия, тыс. кВт·ч/год	420	45

Как видно из таблицы, предлагаемая структура позволяет снизить параметр потока отказов в 4,4 раза, а среднее время восстановления – в 16 раз (с 8 часов до 0,5 часа за счет дистанционного управления и автоматики).

Разработанная новая структура распределительной электрической сети 6 кВ промышленного предприятия базируется на принципах секционирования, резервирования, дистанционного управления и интеллектуальной автоматики. Она позволяет:

- повысить надежность электроснабжения потребителей (снижение параметра потока отказов в 4–5 раз);
- сократить время восстановления питания при авариях с часов до минут за счет автоматического секционирования и АВР;
- снизить потери электроэнергии на 12–18% за счет оптимизации токораспределения;

- обеспечить гибкость и масштабируемость сети при изменении технологических процессов;
- интегрировать распределенную генерацию и накопители энергии в перспективе.

Несмотря на увеличение первоначальных капитальных затрат на 25–35%, предлагаемая структура экономически эффективна благодаря снижению ущерба от недоотпуска электроэнергии и сокращению эксплуатационных расходов. Рекомендуются к внедрению на вновь строящихся и реконструируемых промышленных объектах с высокой требовательностью к надежности электроснабжения.

Список использованных источников

1. Ефимова, Н.Ю. Модернизация методов постатейного анализа очагов потерь мощности в распределительных сетях 10/6/0,4 кВ / Н.Ю. Ефимова, Г.А. Мальцев // Energy Systems Research. – 2022. – Т. 5, № 4. – С. 27–35.
2. Фурсанов, М.И. Расчет технологического расхода (потерь) электроэнергии в современных электрических распределительных сетях 0,38–10 кВ / М.И. Фурсанов, А.А. Золотой, В.В. Макаревич // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2018. – Т. 61, № 5. – С. 408–422.
3. Воротницкий, В.Э. Совершенствование методов расчета и нормирования потерь электроэнергии в распределительных сетях 0,4–10 кВ / В.Э. Воротницкий, А.С. Смирнов // Электрические станции. – 2021. – № 8. – С. 34–41.
4. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е издание. – Москва: Издательство НЦ ЭНАС, 2022. – 512 с.

DEVELOPMENT OF A NEW STRUCTURE FOR DISTRIBUTION ELECTRIC NETWORKS OF INDUSTRIAL POWER SUPPLY SYSTEMS 6 KV

M.M. Agazullin, O.E. Kurakina

*Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia*

The article discusses the improvement of the structure of 6 kV distribution electrical networks in industrial power supply systems. It analyzes the disadvantages of traditional radial and trunk networks and identifies the main operational problems, such as low reliability, high energy losses, and insufficient flexibility in changing technological processes. The article proposes a new distribution network structure based on the principles of sectioning, redundancy, and the use of modern remote-controlled switching devices. It also provides technical and economic advantages of the proposed structure, including increased power supply reliability, reduced energy losses, and faster power restoration during emergencies.

Keywords: distribution network, industrial power supply, 6 kV, network structure, radial scheme, trunk scheme, sectioning, redundancy, reliability, and electricity losses.

ПРИМЕНЕНИЕ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ В ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ: АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Т.С. Ахметзянов

*Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия*

Статья посвящена применению технологий глубокого обучения для диагностики деградации электрической изоляции высоковольтного оборудования. Показано, что традиционные методы классификации частичных разрядов (PD), основанные на ручном извлечении признаков из паттернов или сигналов, зависят от квалификации эксперта и не всегда обеспечивают высокую производительность.

Ключевые слова: *глубокое обучение, частичные разряды (PD), высоковольтное оборудование, электрическая изоляция, свёрточные нейронные сети (CNN).*

Введение. Диагностика деградации электрической изоляции крайне важна для мониторинга целостности электросистемы. Известным диагностическим методом, используемым несколько десятилетий, является измерение локализованных разрядов – частичных разрядов (PD). Обнаружение PD в трансформаторах, вращающихся машинах, кабелях, газоизоляционном распределительном оборудовании (ГИС) и наружных изоляторах традиционно требовало знаний специалистов, которые вручную извлекали параметры из записанных сигналов для последующей классификации. Хотя этот процесс частично автоматизирован, зависимость от ручного выбора признаков создаёт проблему: разные функции приводят к разным результатам, что снижает производительность классификатора [1]. Глубокое обучение позволяет интегрировать этап выбора признаков с процессом обучения, делая его полностью автоматизированным. Благодаря изобилию вычислительных мощностей и больших данных исследователи активно используют алгоритмы глубокого обучения для классификации и локализации PD, а также для определения степени разрушения изоляционного материала. Особого внимания заслуживают генеративные состязательные сети (GAN), позволяющие получать больше входных данных из ограниченного количества экспериментальных результатов [2].

Цель работы – показать применение технологий глубокого обучения для диагностики деградации электрической изоляции высоковольтного оборудования, включая классификацию и локализацию частичных разрядов, а также выявление дефектов и загрязнений в различных устройствах (трансформаторы, кабели, газоизоляционное оборудование, вращающиеся машины, наружные изоляторы).

Основная часть. Глубокое обучение – это раздел машинного обучения, который позволяет обучать представления признаков на основе данных, в отличие от традиционных алгоритмов, где признаки извлекаются

через заданные вручную правила. Это особенно важно в сложных высоковольтных системах, где такие признаки заранее не известны. Выделяют три ключевые парадигмы: контролируемое обучение (с маркированными данными для классификации или регрессии), неконтролируемое (группировка данных по внутренним характеристикам) и обучение с подкреплением (через взаимодействие агента со средой). Для большинства высоковольтных приложений наибольший интерес представляют четыре основных контролируемых алгоритма [3].

Свёрточные нейронные сети (CNN) изначально разработаны для обработки данных в сетчатой топологии, например, изображений. CNN состоит из свёрточных слоёв (набор изучаемых фильтров), функций активации (введение нелинейности), слоёв пулинга (поддискретизация для инвариантности к сдвигу) и полностью связанных слоёв (классификация) [4]. В высоковольтных приложениях используются одномерные CNN для временных рядов волн и двумерные для фазово-разрешённых паттернов PD (PRPD) или спектрограмм. Главное преимущество CNN – совместное распределение веса, снижающее число обучаемых параметров [5]. Рекуррентные нейронные сети (RNN) предназначены для обработки последовательных данных, где выход зависит не только от текущего входа, но и от всей предыдущей истории. Математически скрытое состояние обновляется на основе предыдущего состояния и текущего входа. Недостаток типичных RNN – проблема долгосрочной зависимости и затухающих градиентов, которая решается архитектурой долгой краткосрочной памяти (LSTM). LSTM вводит дополнительные состояния – ячейки памяти и управляющие элементы (входные, забывающие и выходные ворота), что позволяет сохранять информацию на длительных интервалах [6].

Автоэнкодеры (АЕ) состоят из архитектуры кодировщик-декодер, где кодировщик преобразует вход в скрытое (латентное) представление, а декодер восстанавливает исходные данные. Модель обучается минимизировать ошибку реконструкции. Варианты – стековые разреженные автоэнкодеры и вариационные автоэнкодеры (VAE), которые используются для извлечения отличительных признаков из паттернов PRPD. Генеративные состязательные сети (GAN) позволяют генерировать новые данные из неизвестных вероятностных распределений. Генератор создаёт образцы из простого распределения (например, нормального), а дискриминатор учится различать сгенерированные и реальные образцы [7]. Цель – обучить генератор так, чтобы дискриминатор не мог отличить подделку от реальности.

Переходя к конкретным применениям, в ГИС широко используются паттерны PRPD и временные ряды волн для классификации таких источников PD, как выступы, загрязнения, зазоры и свободные частицы. Модели на основе стековых автоэнкодеров, CNN, LSTM (включая сети с самовниманием) и сиамские сети показывают более высокую точность по сравнению с традиционными методами (SVM, BPNN) [8]. В сетях линий передачи общий публичный набор данных повреждённых линий обрабатывается с помощью комбинаций CNN-LSTM с механизмами внимания, а также декомпозиции

временных рядов STL для выделения остаточных компонентов, содержащих PD-импульсы. Во вращающихся машинах глубокое обучение используется не только для классификации источников PD (внутренние пустоты, корона, поверхностные треки), но и для визуального анализа данных с минимальным объёмом маркированных данных, где свёрточный кодировщик проецирует сигналы в двумерное латентное пространство для помощи эксперту. В кабелях и твёрдой изоляции глубокие сети убеждений и CNN успешно классифицируют коронные, поверхностные и внутренние разряды, а также прогнозируют стадию старения изоляции, причём трансферное обучение позволяет сохранять высокую точность даже при зашумлённых PRPD [9]. В трансформаторах глубокое обучение применяется для анализа растворённых газов (DGA) с использованием глубоких сетей убеждений и CNN-LSTM, для обнаружения механических дефектов обмоток по вибрациям и частотным характеристикам, а также для диагностики электрических неисправностей с помощью автоэнкодеров и свёрточных сетей, достигая точности до 99,5%. Для наружных изоляторов основное внимание уделяется обнаружению трещин и сколов с помощью одно- и двухступенчатых детекторов (YOLO, R-CNN), а также классификации гидрофобности и загрязнения по изображениям, где CNN и Bi-LSTM на основе погодных данных позволяют прогнозировать токи утечки и степень эрозии поверхности [10].

Заключение. Итак, глубокое обучение автоматизирует диагностику изоляции высоковольтного оборудования, улучшая классификацию, локализацию ЧР и оценку деградации. Однако, для внедрения в реальные системы необходима работа с реальными данными, шумами и множественными ЧР. Будущие исследования должны включать неконтролируемое обучение, GAN, многодатчиковые системы, дроны, а также моделирование старения и гиперпараметрическую оптимизацию. Цифровые двойники с применением глубокого обучения станут основой для виртуальных представлений энергетических активов.

Список использованных источников

1. Gataullin A.M. Insulators electrical strength estimation under ac applied voltage. В сборнике: Proceedings – 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2019. – 2019. – С. 35-39.
2. Танг Дж.; Джин, М.; Зенг, Ф.; Чжан, Х.; Хуанг, Р. Оценка тяжести ПД в газоизоляционной распределительной системе с помощью SSAE. IET Sci. Meas. Technol. – 2017. – № 11. – С. 423–430.
3. Хуссейн М.Р.; Refaat, S.S.; Абу-Руб, Х. Обзор и анализ частичного разряда силовых трансформаторов: обзор литературы. Доступ к IEEE 2021, 9, 64587–64605.
4. Gataullin A.M., Gubaev D.F., Khusnutdinov R.R. Automation of high-voltage electrical equipment insulators diagnostics by partial discharges method. В сборнике: Proceedings – 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021. – 2021. – С. 58-62.
5. Лонг Дж.; Ван, Х.; Чжоу, В.; Чжан, Дж.; Дай, Д.; Чжу, Г. Комплексный обзор технологий обработки сигналов и машинного обучения для обнаружения и диагностики UHF PD (I): Подходы к предварительной обработке и локализации. Доступ к IEEE 2021, 9, 69876–69904.

6. Gataullin A.M., Gubaev D.F., Gataullina R.V. Software and hardware system of monitoring high-voltage electric equipment based on the analysis of partial discharge characteristics // В сборнике: International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Proceedings. – 2023. – С. 171-176.

7. Синага Х.; Фунг, Б.; Блэкберн, Т. Локализация частичного разряда в трансформаторах с использованием метода обнаружения UHF. IEEE Trans. Dielectr. Электрик. Инсуль. – 2012. – № 19. – С. 1891-1900.

8. Gataullin A.M. Online monitoring of the porcelain insulator units state // В сборнике: 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020. – 2020. – С. 9271631.

9. Ло Ю.; Ли, З.; Ван, Х. Обзор онлайн-измерения частичного разряда крупных генераторов. Энергии 2017, 10, 1694.

10. Gataullin A.M. Online technology of insulators condition monitoring in smart grid power supply systems // В сборнике: 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019. 2019. – С. 8934770.

APPLICATION OF DEEP LEARNING IN HIGH VOLTAGE ELECTRICAL ENGINEERING: ANALYTICAL REVIEW

T.S. Akhmetzyanov

*Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia*

The article is devoted to the application of deep learning technologies for the diagnosis of degradation of electrical insulation of high-voltage equipment. It is shown that traditional methods of partial discharge classification (PD) based on manual extraction of features from patterns or signals depend on the expert's qualifications and do not always provide high performance.

Keywords: deep learning, partial discharges (PD), high-voltage equipment, electrical isolation, convolutional neural networks (CNN).

УДК 004.932

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ВИЗУАЛЬНОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ В СБОРОЧНЫХ ОПЕРАЦИЯХ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Б.Р. Бакланов, И.В. Воробьев, М.А. Монахов

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
г. Санкт-Петербург, Россия*

Работа посвящена анализу современных методов машинного зрения в задачах выявления дефектов при автоматизированной сборке в приборостроении. Рассмотрены теоретические аспекты, подходы к внедрению, коммерческие платформы и научные разработки. Особый акцент сделан на опыте российских специалистов и зарубежных решениях. Выявлены сильные стороны, ограничения и направления дальнейшего развития систем визуального контроля в условиях жёстких требований к качеству.

Ключевые слова: машинное зрение, контроль дефектов, автоматизированная сборка, приборостроение, обнаружение аномалий, глубокое обучение.

1. Введение

Современное приборостроение характеризуется высокими требованиями к точности, надёжности и воспроизводимости сборочных процессов. Даже незначительные отклонения в геометрии или состоянии компонентов могут привести к функциональным сбоям в конечном изделии, особенно в таких критически важных отраслях, как медицинская техника или аэрокосмическая промышленность [1]. В этих условиях традиционные методы контроля качества, основанные на ручном визуальном осмотре или периодическом выборочном тестировании, становятся всё менее эффективными: они субъективны, трудоёмки и не обеспечивают сплошного контроля в реальном времени [2].

На фоне роста автоматизации производственных линий возрастает потребность в интеллектуальных системах неразрушающего контроля, способных интегрироваться непосредственно в поток сборки. Одним из наиболее перспективных направлений является применение технологий машинного зрения (machine vision), которые позволяют автоматически выявлять дефекты на ранних этапах технологического цикла, минимизируя риск дальнейшей обработки бракованных деталей [3]. В отличие от классического компьютерного зрения, ориентированного на интерпретацию сцен, промышленное машинное зрение фокусируется на решении узких, воспроизводимых задач – таких как измерение, позиционирование и, в частности, дефектоскопия – с высокой скоростью и точностью [4].

Несмотря на активное внедрение систем машинного зрения в машиностроение и электронику, их применение в специализированном сегменте приборостроения остаётся недостаточно систематизированным. Многие предприятия по-прежнему сталкиваются с проблемами выбора архитектуры системы, методов обработки изображений и критериев оценки эффективности контроля [5]. В то же время последние достижения в области глубокого обучения, особенно в задачах аномалия-детекции (anomaly detection), открывают новые возможности для повышения чувствительности и адаптивности систем визуального контроля даже при ограниченном количестве обучающих данных с дефектами [6].

Целью настоящей статьи является систематизация и критический анализ существующих подходов к использованию систем машинного зрения для дефектоскопии деталей непосредственно на этапе автоматизированной сборки в приборостроении. Особое внимание уделено работе отечественных исследователей в области интеллектуальных систем контроля, а также международному опыту внедрения промышленных решений.

2. Теоретические основы визуальной дефектоскопии в приборостроении

В приборостроении качество компонентов напрямую определяет функциональную надёжность конечного изделия. Дефекты, незаметные

невооружённым глазом, могут нарушать электрические контакты, изменять тепловые характеристики или снижать механическую прочность узлов. В связи с этим дефектоскопия деталей на этапе автоматизированной сборки становится неотъемлемой частью системы обеспечения качества.

Согласно классификации, принятой в промышленной метрологии и стандартизированной в документах ISO и ГОСТ, дефекты условно делятся на три категории [8]:

1. Поверхностные дефекты – царапины, сколы, окисления, загрязнения. Особенно критичны при сборке оптических и сенсорных модулей [4].

2. Геометрические отклонения – несоответствия размерам, форме или взаимному расположению элементов. В прецизионных узлах такие отклонения могут привести к накоплению погрешностей [2].

3. Структурные дефекты – микротрещины, поры, расслоения. Некоторые из них могут быть выявлены методами машинного зрения при использовании специализированного освещения [5].

Эффективность визуальной дефектоскопии определяется не только разрешающей способностью камеры, но и всей системой захвата и обработки изображений. Ключевыми параметрами являются: пространственное разрешение, скорость обработки, устойчивость к вариациям освещения и повторяемость результатов [2]. В условиях автоматизированной сборки система должна обеспечивать минимальные задержки между захватом изображения и выдачей управляющего сигнала.

Современные подходы к дефектоскопии базируются на трёх парадигмах:

- Сравнение с эталоном – эффективно при стабильной геометрии, но чувствительно к смещениям [10];

- Правило-ориентированные методы – используют морфологическую обработку и пороговую сегментацию [5];

- Методы на основе машинного обучения, особенно глубокого обучения, позволяют автоматически извлекать признаки дефектов без явного программирования правил [3].

Нормативная база включает международные стандарты (ISO 2859 [8], ISO 13485 [16]) и отраслевые спецификации, например, IPC-A-610 для электронных компонентов [11]. Однако эти документы редко содержат конкретные рекомендации по применению машинного зрения, что подчёркивает необходимость методологической проработки данного направления.

3. Методология исследования

3.1. Общая методологическая рамка

Типичный цикл внедрения визуального контроля включает: захват изображения, предварительную обработку, детекцию аномалий, принятие решения и взаимодействие с системой управления [2].

На этапе захвата критически важны выбор оптики, сенсора и схемы освещения. В приборостроении часто используются диффузное или косое освещение для минимизации бликов [9]. Время экспозиции синхронизируется с тактом сборочной линии через триггерные сигналы от ПЛК.

Предварительная обработка включает коррекцию неоднородности освещения, фильтрацию шумов и геометрическую калибровку [10].

На этапе детекции аномалий применяются алгоритмы, соответствующие выбранной парадигме. Результатом является карта отклонений или бинарная маска.

Принятие решения осуществляется по заранее заданным порогам. Важно учитывать технические требования к конкретному компоненту [5].

Наконец, система взаимодействует с ПЛК через промышленные интерфейсы (например, OPC UA Vision [19]). Время отклика в высокоскоростных линиях не должно превышать 100–200 мс [4].

Эффективность оценивается по метрикам: чувствительность (recall), точность (precision), F1-мера и уровень ложных срабатываний [3].

3.2. Аналитический обзор и сравнительный анализ

Проведён систематический анализ существующих решений в соответствии с методологией PRISMA [12].

Коммерческие решения. Платформа Cognex ViDi использует свёрточные нейросети с обучением без учителя [13]. Система Keyence CV-X предлагает встроенные алгоритмы «Learning Inspection» [8]. Платформа Halcon от MVTec предоставляет гибкий инструментарий для разработки кастомных решений [14].

Научные разработки. Исследования на датасете MVTec AD демонстрируют эффективность методов, основанных на автокодировщиках и трансформерах для выявления микродефектов [6].

Сравнительный анализ. Коммерческие системы обеспечивают высокую надёжность и простоту интеграции, но ограничены в гибкости. Научные методы предлагают передовые алгоритмы, но требуют доработки для работы в реальных условиях [3].

Ключевыми вызовами являются: недостаток размеченных датасетов, сложность обобщения моделей на новые типы деталей и необходимость интерпретируемости решений [3].

4. Обсуждение результатов

Проведённый анализ показывает, что системы машинного зрения способны обеспечить сплошной 100 %-ный контроль, исключая человеческий фактор [2]. В отличие от ручного осмотра, визуальные системы позволяют выявлять дефекты на самых ранних этапах [5].

Сравнение коммерческих и научных подходов выявляет компромисс между готовностью к внедрению и алгоритмической гибкостью [13, 14]. Платформы вроде Cognex ViDi привлекательны для предприятий без ИТ-команд, но могут оказаться неэффективными при работе с уникальными изделиями [8]. Научные методы, напротив, демонстрируют высокую чувствительность, но требуют адаптации к производственной среде [6].

Особое внимание заслуживает проблема обучения без учителя, доминирующая в промышленной практике. Поскольку дефектные образцы встречаются редко, большинство систем строятся на принципе «обучения на норме» [6]. Подход, реализованный в датасете MVTec AD, показывает F1-меру до 0.92 на промышленных объектах [6].

Экономический эффект проявляется в снижении уровня брака и повышении общего коэффициента эффективности оборудования (ОЕЕ). По данным McKinsey (2022), предприятия сократили простои на 15–30 % [15]. Кроме того, цифровая фиксация каждого цикла создаёт аудиторский след, необходимый для сертификации по стандартам ISO 13485 [16].

Ограничения включают: физические пределы разрешения оптики [4], сложности с глянцевыми поверхностями [5], вычислительную нагрузку, требующую edge-устройств (например, NVIDIA Jetson [17]).

Перспективы развития лежат в интеграции с цифровыми двойниками, создании самообучающихся систем и стандартизации метрик качества [18].

5. Заключение

Проведённый анализ подтверждает, что системы машинного зрения представляют собой эффективный инструмент для дефектоскопии в приборостроении. В условиях высоких требований к качеству визуальный контроль становится необходимым элементом системы управления качеством [1].

На основе обзора можно сделать вывод, что наиболее перспективными являются гибридные подходы, сочетающие классические методы с глубоким обучением, особенно в режиме обучения без учителя [6].

Успешное внедрение требует учёта инженерных, экономических и нормативных аспектов: выбора оптики, интеграции с PLC, соответствия стандартам [2, 16]. Отсутствие единых метрик оценки по-прежнему затрудняет сравнение решений [3].

Для предприятий рекомендуется начинать с пилотных проектов на критически важных узлах, используя готовые платформы [8, 13]. Параллельно целесообразно вести архив данных для будущего дообучения.

В перспективе исследования должны быть направлены на создание открытых датасетов, интерпретируемых моделей и стандартизацию интерфейсов (например, OPC UA Vision [18]).

Таким образом, машинное зрение уже сегодня способно внести значительный вклад в повышение качества продукции приборостроения.

Список использованных источников

1. ISO 9001:2015 – Quality management systems – Requirements. – Geneva: International Organization for Standardization, 2015.
2. Beyerer J., Puente León F., Frese C. Machine Vision: Automated Visual Inspection: Theory, Practice and Applications. – Berlin: Springer, 2016. – 578 p. – DOI: 10.1007/978-3-662-49797-1.
3. Zhang Y., Liu Y., Sun P. et al. Deep Learning for Industrial Inspection: A Survey // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2021. – Vol. 17, № 9. – P. 5853–5867. – DOI: 10.1109/TII.2020.3030142.
4. Hornberg A. (Ed.). Handbook of Machine Vision. 3rd ed. – Weinheim: Wiley-VCH, 2022. – 624 p. – DOI: 10.1002/9783527699527.
5. Demant C., Steiner B., Gläser P. Industrial Image Processing: Visual Quality Control in Manufacturing. – Berlin: Springer, 2019. – 352 p. – DOI: 10.1007/978-3-662-59424-0.

6. Bergmann P., Fauser M., Sattlegger D., Steger C. The MVTec Anomaly Detection Dataset: A Comprehensive Real-World Dataset for Unsupervised Anomaly Detection // International Journal of Computer Vision. – 2021. – Vol. 129. – P. 1038–1059. – DOI: 10.1007/s11263-020-01400-4
7. ГОСТ Р ИСО 2859-1-2017. Статистические методы. Процедуры выборочного контроля по альтернативному признаку. Часть 1. Планы выборочного контроля на основе приемлемого уровня качества (AQL). – Введ. 2018-07-01. – М.: Стандартинформ, 2017.
8. Keyence Corporation. Machine Vision System Handbook. Osaka: Keyence, 2022. – 412 p. URL: <https://www.keyence.com/ss/products/vision/handbook/>
9. Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM). Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). JCGM 100:2008. – Paris: BIPM, 2008. – 134 p. URL: <https://www.bipm.org/en/publications/guides/gum>
10. Gonzalez R.C., Woods R. E. Digital Image Processing. 4th ed. Upper Saddle River: Pearson, 2018. – 1200 p. – ISBN: 978-0133356724.
11. IPC-A-610H. Acceptability of Electronic Assemblies. – Northbrook: IPC, 2020. – 984 p.
12. Page M. J., McKenzie J. E., Bossuyt P. M. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews // BMJ. – 2021. – Vol. 372. – P. n71. – DOI: 10.1136/bmj.n71
13. Cognex Corporation. Cognex ViDi Suite: Deep Learning-Based Machine Vision Software. Technical Documentation. – Natick: Cognex, 2023. – URL: <https://www.cognex.com/products/machine-vision/vision-software/cognex-vidi>
14. MVTec Software GmbH. Halcon 22.11 Progress: Technical Reference Manual. – Munich: MVTec, 2023. – URL: <https://www.mvtec.com/products/halcon/documentation>
15. McKinsey & Company. AI in manufacturing: Use cases that deliver value. Industry Report. – 2022. – URL: <https://www.mckinsey.com/industries/operations/our-insights/ai-in-manufacturing>
16. ГОСТ Р ИСО 13485-2017. Изделия медицинские. Системы менеджмента качества. Требования для целей регулирования. – М.: Стандартинформ, 2017.
17. NVIDIA Corporation. Jetson AGX Orin Developer Kit Technical Specifications. Santa Clara: NVIDIA, 2023. URL: <https://developer.nvidia.com/embedded/jetson-agx-orin>
18. OPC Foundation. OPC UA Vision Companion Specification. Release 1.01. Scottsdale: OPC Foundation, 2021. – URL: <https://opcfoundation.org/developer-tools/specifications-opc-ua/vision/>

THE USE OF VISUAL FLAW DETECTION IN ASSEMBLY OPERATIONS IN INSTRUMENT ENGINEERING

B.R. Baklanov, I.V. Vorobyov, M.A. Monakhov

*Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
Saint-Petersburg, Russia*

The paper analyzes modern machine vision methods for defect detection in automated assembly processes in instrument engineering. Theoretical aspects, implementation approaches, commercial platforms, and scientific developments are considered. Particular emphasis is placed on the experience of Russian specialists and international

solutions. The strengths, limitations, and directions for further development of visual inspection systems are identified under strict quality requirements.

Keywords: *machine vision, defect control, automated assembly, instrument engineering, anomaly detection, deep learning.*

УДК 681.5

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РОБОТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ ЭЛЕКТРОНИКИ

Б.Р. Бакланов, И.В. Воробьев, М.А. Монахов

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
г. Санкт-Петербург, Россия*

Современное производство электронных устройств невозможно без высокой степени автоматизации. Роботизированные системы, основанные на технологии поверхностного монтажа (SMT), обеспечивают высокую точность, производительность и стабильность качества при сборке печатных плат. В данной статье представлен подробный анализ ключевых этапов роботизированной сборки – установки компонентов, пайки (рефлouw, волновая, лазерная) и нанесения защитных покрытий и герметиков. Рассмотрены принципы работы оборудования, технические характеристики современных установочных машин, термические профили пайки, методы контроля качества, а также интеграция систем машинного зрения, цифровых двойников и промышленного интернета вещей (IIoT).

Ключевые слова: *роботизированная сборка, SMT, поверхностный монтаж, рефлouw-пайка, диспенсинг, конформное покрытие, машины pick-and-place, IPC-стандарты, цифровой двойник.*

Производство электроники переживает глубокую трансформацию, вызванную требованиями к миниатюризации, повышению плотности компоновки, увеличению надёжности и сокращению сроков вывода продукции на рынок. Автоматизация всех этапов сборки, начиная от подготовки материалов до финального тестирования, стала неотъемлемым элементом конкурентоспособного производства. Наиболее развитым и массовым направлением является технология поверхностного монтажа (SMT), позволяющая устанавливать компоненты непосредственно на контактные площадки печатной платы без сквозных отверстий.

Глобальный рынок SMT-оборудования продолжает расти, что связано с развитием автомобильной электроники, медицинских устройств, IoT и телекоммуникационного оборудования. Современные роботизированные линии обеспечивают скорость установки более 100 000 компонентов в час при точности позиционирования до нескольких микрон. Это стало возможным благодаря интеграции прецизионных механических систем, машинного зрения, адаптивного управления и цифровых технологий.

В данной статье рассматриваются основные этапы роботизированной сборки: установка компонентов, процессы пайки и нанесение защитных составов. Особое внимание уделяется реальным промышленным решениям, их техническим параметрам и соответствию международным стандартам.

2. Технологии установки компонентов (SMT Pick-and-Place)

Установка компонентов – наиболее ответственный этап SMT-линии, определяющий точность последующих операций. Современные установочные машины (pick-and-place) работают на скорости от 10 000 до более чем 150 000 компонентов в час (CPH) с точностью позиционирования до ± 15 мкм.

2.1. Принцип работы

Процесс включает захват компонента из ленты, матрицы или трубки с помощью вакуумного захвата, проверку его ориентации и целостности с помощью камер машинного зрения, коррекцию положения и установку на плату. Системы оснащены многоосевыми приводами (X-Y-Z- θ), обеспечивающими движение по плате, а также быстродействующими головками с несколькими насадками для параллельной работы.

2.2. Основные типы оборудования

Одной из наиболее распространённых моделей является Yamaha YV100XG, разработанная компанией Yamaha Motor Co., Ltd. Машина имеет производительность до 105 000 CPH при монтаже чип-компонентов (например, 0402) и обеспечивает точность установки $\pm 0,05$ мм (при условиях 3 σ). Она поддерживает платы размером до 510 × 460 мм и оснащена системой машинного зрения для контроля компонентов перед установкой [1].

Еще одной передовой системой является Siemens Siplace X4, способная достигать скорости до 124 000 CPH. Машина поддерживает широкий диапазон компонентов – от 01005 (0,4 × 0,2 мм) до крупных BGA размером 200 × 125 мм. Использование технологии Smart Flow позволяет оптимизировать траекторию движения головки, снижая время цикла и вибрации [2].

2.3. Контроль качества

Отклонения при установке регламентируются стандартом IPC-A-610, который определяет допустимые смещения компонентов относительно контактных площадок. Например, для QFP-корпусов с шагом 0,5 мм смещение не должно превышать 25% ширины вывода. Для обеспечения соответствия используются системы автоматического оптического контроля (AOI) после установки и пайки, которые применяют 3D-инспекцию с точностью до 3 мкм.

3. Технологии пайки

После установки компонентов осуществляется пайка, обеспечивающая электрическое соединение. Выбор метода зависит от типа компонентов, конструкции платы и требований к надёжности.

3.1. Рефлю-пайка

Наиболее распространённый метод для SMT. Процесс происходит в многозонной печи, где плата проходит через следующие этапы:

– Предварительный нагрев (100–150°C);

- Активация флюса (150–180°C);
- Пайка (пиковая температура 230–260°C для бессвинцового припоя);
- Охлаждение.

Современные рефлюо-печи, такие как Heller 1707 MKIII, имеют 10 зон нагрева, включая комбинированные (инфракрасный + конвекция), и позволяют задавать профиль с точностью $\pm 1^\circ\text{C}$. Это обеспечивает равномерный прогрев плат и минимизирует термические напряжения в компонентах [3].

Для бессвинцовых припоев (SnAgCu) типичная пиковая температура – 245–255°C, а продолжительность времени выше ликвидуса должна составлять не менее 60 секунд. Нарушение термического профиля может привести к дефектам: неполной смачиваемости, образованию трещин или пористости в паяном шве.

3.2. Волновая пайка

Применяется для монтажа компонентов с выводами (THT), а также в гибридных сборках. Жидкий припой подаётся через «волну», над которой перемещается плата. Компания Ersa выпускает системы серии POWERFLOW PRO, использующие двухволновую технологию (турбулентная + ламинарная волна) для качественного заполнения отверстий. Такие системы оснащены контролем уровня припоя и защитой от окисления [4].

Стандарт IPC-J-STD-001 определяет требования к качеству паяных соединений: угол смачивания, заполнение отверстий (минимум 75%), отсутствие пор и трещин.

3.3. Локальные методы пайки

Для чувствительных компонентов или ремонта используются точечные методы:

- Лазерная пайка – сфокусированный луч нагревает только одну зону, минимизируя тепловое воздействие на соседние элементы;
- Индукционная пайка – эффективна для крупных корпусов с высокой тепловой инерцией.

Эти методы особенно важны при работе с гибкими печатными платами и MEMS-устройствами.

4. Нанесение герметиков и защитных покрытий

Электронные модули, работающие в агрессивных условиях (влажность, пыль, химикаты, вибрации), требуют дополнительной защиты. Современные методы основаны на роботизированном диспенсинге и конформном покрытии.

4.1. Диспенсинг

Роботизированные диспенсеры наносят клей, герметик или подушку под компонент (underfill). Компания Nordson ASYMTEK предлагает системы серии Forte, обеспечивающие точность нанесения до $\pm 0,05$ мм и объём от 1 нанолитра. Системы поддерживают как контактное дозирование, так и струйную подачу (jetting), что позволяет работать с высокой скоростью и избегать контакта с хрупкими компонентами.

4.2. Конформное покрытие

Нанесение тонкоплёночного защитного слоя (толщиной 25–75 мкм) на всю поверхность платы. Материалы: акрилы, уретаны, силиконы, эпоксиды. Стандарт IPC-CC-830B устанавливает требования к электрическим, механическим и климатическим свойствам покрытий, включая сопротивление изоляции, адгезию и устойчивость к температурам. [5].

Роботы могут наносить покрытие методом распыления, погружения или кистью, а также обеспечивать селективное (выборочное) нанесение на требуемые участки платы. [6]

5. Интеграция и цифровизация производства

Современные SMT-линии интегрированы в экосистему Industry 4.0. Ключевые элементы:

- Цифровой двойник (Digital Twin) – виртуальная модель линии, используемая для моделирования, оптимизации и предиктивного обслуживания.

- IoT и MES – системы управления производством собирают данные с оборудования в реальном времени, позволяя контролировать ОЕЕ, выявлять узкие места и управлять запасами;

- AI и машинное обучение – используются для анализа данных AOI и предсказания дефектов. Алгоритмы классификации изображений могут различать типы дефектов пайки с точностью >95%.

6. Заключение

Роботизированная сборка электроники достигла высокого уровня автоматизации и точности. Современные SMT-линии объединяют высокоскоростные установщики, прецизионные печи, системы диспенсинга (Nordson) и конформного покрытия, все это под управлением цифровых платформ. Соответствие стандартам IPC (J-STD-001, A-610, CC-830B) гарантирует высокое качество продукции.

Перспективные направления включают дальнейшую интеграцию ИИ, развитие микроробототехники для сборки наноустройств и расширение применения цифровых двойников. Эти технологии уже сегодня используются в аэрокосмической, медицинской и автомобильной промышленности, где отказоустойчивость и надёжность имеют первостепенное значение.

Список использованных источников

1. Yamaha Motor Co., Ltd. YV100XG High-Speed Mounter – Technical Specifications. URL: <https://www.yamaha-motor.com/electronics/assembly-equipment/yv100xg/>

2. Автомат установки компонентов ASM | SIPLACE X // Глобал Инжиниринг URL: <https://global-smt.ru/catalog/smt-automatic-placers/asm-siplace-x/?ysclid=mi1qmws2n3920945042>

3. Used HELLER 1707 MKIII // caeonline URL: <https://caeonline.com/buy/re-flow-ovens/heller-1707-mkiii/9177084>

4. ERSA POWERFLOW PRO Nitrogen Wave Soldering Machine // flason URL: <https://www.flason-smt.com/product/ERSA-POWERFLOW-PRO-Wave-Soldering-Machine.html>

5. IPC. IPC-CC-830B: Performance Standard for Electrical Insulating Compounds for Printed Wiring Boards. 2020.

6. Как машины для нанесения конформных покрытий повышают надежность автомобильной электроники // ICT URL: <https://smtmachineline.com/ru/conformal-coating-machines-automotive-electronics-reliability/>

THE USE OF ROBOTIC SYSTEMS FOR AUTOMATED ELECTRONICS ASSEMBLY

B.R. Baklanov, I.V. Vorobyov, M.A. Monakhov

*Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
Saint Petersburg, Russia*

Modern production of electronic devices is impossible without a high degree of automation. Robotic systems based on surface mount technology (SMT) ensure high accuracy, performance, and quality stability when assembling printed circuit boards. This article provides a detailed analysis of the key stages of robotic assembly, including component installation, soldering (reflow, wave, and laser), and the application of protective coatings and sealants. It discusses the principles of equipment operation, the technical characteristics of modern installation machines, the thermal profiles of soldering, quality control methods, and the integration of machine vision systems, digital twins, and the Industrial Internet of Things (IIoT).

Keywords: *robotic assembly, SMT, over-the-board surface mounting, reflow soldering, dispensing, conformal coating, pick-and-place machines, IPC standards, digital twin.*

УДК: 681.5.015.4

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ НА ЭТАПЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КОРРЕКТИРОВКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Б.Р. Бакланов, И.В. Воробьев, М.А. Монахов

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
г. Санкт-Петербург, Россия*

В статье рассматривается теоретический потенциал систем машинного зрения (СМЗ) для повышения адаптивности и эффективности автоматизированных сборочных процессов в приборостроении. Обосновывается концепция замкнутого управляющего контура с визуальной обратной связью (vision-in-the-loop), позволяющая не только контролировать, но и динамически корректировать сборочные операции в реальном времени. Предложена трёхуровневая архитектура СМЗ (сенсорный, вычислительный и управляющий уровни) и определены ключевые показатели эффективности, такие как ОЕЕ, доля дефектов и стабильность тактового времени. Проведён сравнительный анализ существующих промышленных решений и научных подходов, выявлены текущие барьеры внедрения.

Ключевые слова: *система машинного зрения, автоматизированная сборка, адаптивное управление, vision-in-the-loop, ОЕЕ*

Современное приборостроение характеризуется высокими требованиями к точности, повторяемости и надёжности сборочных операций. В условиях автоматизированного производства эффективность системы управления определяется такими показателями, как точность позиционирования исполнительных механизмов, стабильность тактового времени и уровень производственного брака. Однако традиционные архитектуры промышленных систем управления – включая программируемые логические контроллеры (PLC), SCADA и MES – зачастую функционируют без прямой обратной связи от физического состояния объекта управления, что ограничивает их адаптивность к реальным условиям сборки.

Системы машинного зрения (СМЗ) позволяют преодолеть это ограничение, обеспечивая объективную информацию о ходе сборочного процесса в реальном времени. Их интеграция в контур управления открывает возможность реализации концепции *vision-in-the-loop* – замкнутого цикла управления с визуальной обратной связью. Целью настоящей работы является теоретическое исследование потенциала СМЗ для оценки и адаптивной корректировки эффективности системы управления на этапе автоматизированной сборки в приборостроении.

В рамках исследования рассматриваются два направления:

- Сценарий А: теоретическое обоснование архитектуры СМЗ с замкнутым контуром обратной связи;
- Сценарий Б: аналитический обзор и систематизация существующих подходов к использованию машинного зрения для коррекции управляющих стратегий.

Теоретические основы взаимодействия машинного зрения и систем управления в промышленной автоматизации

Эффективность системы управления в контексте сборочных процессов может быть количественно оценена с помощью таких метрик, как Overall Equipment Effectiveness (OEE), доля дефектов и стабильность производственного цикла. Современные системы управления (PLC/SCADA/MES) обеспечивают надёжное выполнение заданных алгоритмов, но не обладают встроенными средствами восприятия внешней среды.

Системы машинного зрения компенсируют этот недостаток, реализуя следующую последовательность: захват изображения → предварительная обработка → сегментация и распознавание → генерация управляющих сигналов [6]. Ключевым элементом интеграции является обеспечение детерминированной передачи данных между СМЗ и контроллером, что требует соблюдения строгих временных ограничений (обычно < 100 мс для высокоскоростной сборки).

Концепция *vision-in-the-loop* предполагает, что данные от СМЗ используются не только для мониторинга, но и для активной коррекции управляющих воздействий. Это позволяет повысить устойчивость процесса к внешним возмущениям (вибрации, тепловые расширения, износ инструмента и др.).

Методология исследования

3.1. Общая методологическая рамка

Интеграция СМЗ в контур управления теоретически может быть реализована по следующей схеме:

1. Сбор визуальных данных с помощью промышленной камеры;
2. Обработка изображений и извлечение признаков (например, координаты компонента, ориентация, наличие дефектов);
3. Расчёт отклонений от заданного состояния на основе заранее определённых допусков;
4. Формирование и передача корректирующих команд в систему управления.

В качестве критериев оценки эффективности предлагаются следующие ключевые показатели эффективности (KPI):

1. ОЕЕ (в соответствии с ISO 22400-2);
2. Доля дефектов на единицу продукции;
3. Стандартное отклонение тактового времени как мера стабильности процесса;
4. Время реакции системы на выявленное отклонение.

3.2. Сценарий А: Теоретическое обоснование архитектуры системы

Предлагаемая архитектура СМЗ включает три основных уровня:

1. Сенсорный уровень: промышленная камера (например, с интерфейсом GigE Vision или USB3 Vision), источник стабилизированного освещения (кольцевой или коаксиальный LED), оптическая система с фиксированным фокусным расстоянием для минимизации искажений.

2. Вычислительный уровень: модуль обработки изображений, реализующий алгоритмы предварительной фильтрации (медианный/гауссов фильтр), сегментации (например, на основе пороговой бинаризации или методов машинного обучения), а также распознавания (шаблонное сопоставление, геометрические дескрипторы). Для обеспечения детерминированности рекомендуется использование выделенного вычислителя (например, FPGA или промышленного ПК с RT-ядром).

3. Управляющий уровень: интерфейс взаимодействия со средой управления (PLC/SCADA) через промышленные протоколы – OPC UA, Modbus TCP или PROFINET. На этом уровне формируются управляющие команды (например, коррекция координат захвата, повторная попытка установки, аварийная остановка).

Теоретически такая архитектура позволяет реализовать как реактивную, так и прогнозирующую коррекцию, при условии соблюдения временных и точностных требований.

3.3. Сценарий Б: Аналитический обзор и сравнительный анализ

Проведён сравнительный анализ промышленных решений от Cognex, Keyence, Basler и Halcon. Установлено, что большинство систем поддерживают интеграцию с PLC через стандартные протоколы (Modbus TCP,

PROFINET, OPC UA), однако реализуют преимущественно реактивную коррекцию – по факту обнаружения отклонения.

Анализ научных публикаций выявил растущий интерес к прогнозирующей коррекции на основе анализа трендов и применения методов машинного обучения. Основными барьерами внедрения остаются:

1. Чувствительность к условиям освещения и вибрациям.
2. Вычислительная сложность алгоритмов.
3. Отсутствие унифицированных стандартов взаимодействия между СМЗ и системами управления.

Классификация подходов к корректировке управляющих алгоритмов может быть представлена следующим образом:

Реактивная коррекция: немедленная реакция на выявленное отклонение (например, повторная попытка позиционирования);

Прогнозирующая коррекция: адаптация управляющей стратегии на основе анализа исторических данных и трендов (например, компенсация систематического смещения из-за износа инструмента).

Обсуждение результатов

Теоретический анализ показывает, что интеграция СМЗ в контур управления способна значительно повысить адаптивность и устойчивость сборочного процесса. Возможность получения объективной информации о физическом состоянии объекта управления позволяет не только фиксировать отклонения, но и своевременно их компенсировать.

Экономический потенциал такого подхода проявляется в снижении уровня брака, сокращении простоев и увеличении uptime оборудования. Однако для практической реализации необходимо решить ряд задач:

1. Обеспечение детерминированной задержки обработки.
2. Повышение робастности алгоритмов к изменению внешних условий.
3. Стандартизация интерфейсов «зрение–управление».

Перспективным направлением является масштабирование подхода на другие этапы производственного цикла – от входного контроля до финального тестирования и калибровки.

Заключение

1. Подтверждена гипотеза о том, что интеграция систем машинного зрения в контур управления позволяет объективно оценивать и повышать эффективность автоматизированных сборочных процессов в приборостроении.

2. В рамках Сценария А предложена теоретическая архитектура СМЗ с трёхуровневой структурой (сенсорный, вычислительный, управляющий), обеспечивающая возможность замкнутого контура обратной связи.

3. В рамках Сценария Б выявлены ключевые тенденции: переход от реактивной к прогнозирующей коррекции, рост роли ИИ и цифровых двойников.

4. Разработаны методологические рекомендации для инженеров АСУТП по выбору архитектурных решений и критериев оценки эффективности.

5. Перспективными направлениями дальнейших исследований являются:

- применение моделей глубокого обучения для прогнозирования отклонений;
- интеграция с цифровыми двойниками в реальном времени;
- разработка открытых стандартов взаимодействия на базе OPC UA и IEC 61131-3.

Список использованных источников

1. PLC, DCS и SCADA: детальный разбор систем управления и их роль в современной автоматизации // Школа для электрика URL: <https://electricalschool.info/automation/3236-plc-dcs-i-scada-razbor-sistem-upravleniya.html>

2. Human-in-the-Loop Machine Learning (HITL) Explained // ENCORD URL: <https://encord.com/blog/human-in-the-loop-ai/>

3. Nakjima, Seiichi (1989). TPM Development Program. Productivity Press, Inc. pp. 28–31. ISBN 0-915299-46-1

4. Как находить стандартное отклонение: простые способы расчёта // SKYPRO URL: <https://sky.pro/wiki/analytics/kak-nahodit-standartnoe-otklonenie-prostye-sposoby-raschyota/>

5. GigE Vision // Common Vision Blox URL: https://help.commonvisionblox.com/NextGen/14.1/md_theory_of_operation_hardware__gig_e_vision.html

6. IEC 61131-3:2025 Programmable controllers – Part 3: Programming languages URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/68533>

USE OF THE MACHINE VISION SYSTEM AT THE STAGE OF AUTOMATED ASSEMBLY IN THE INSTRUMENTATION INDUSTRY FOR DETERMINING AND CORRECTING THE EFFICIENCY OF THE CONTROL SYSTEM

B.R. Baklanov, I.V. Vorobyov, M.A. Monakhov

*Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
Saint-Petersburg, Russia*

The paper explores the theoretical potential of machine vision systems (MVS) to enhance the adaptability and efficiency of automated assembly processes in instrumentation and precision engineering. The concept of a closed-loop control system with visual feedback (vision-in-the-loop) is justified, enabling not only monitoring but also real-time dynamic correction of assembly operations. A three-tier MVS architecture—sensory, computational, and control—is proposed, along with key performance indicators such as Overall Equipment Effectiveness (OEE), defect rate, and cycle time stability. A comparative analysis of existing industrial solutions and research approaches is conducted, identifying current implementation barriers and outlining promising future directions.

Keywords: machine vision system, automated assembly, adaptive control, vision-in-the-loop, OEE.

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ АНАЛИТИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ НАВИГАТОР BI В СФЕРЕ УПРАВЛЕНИЯ ФИНАНСАМИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

М. Барабаш, Е. Казанцева, В. Сычиков, Д. Федорина

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,
г. Москва, Россия*

В статье рассмотрены возможности применения аналитической платформы Навигатор BI в сфере управления финансами промышленного предприятия. Обоснована актуальность использования BI-платформ для консолидации финансовых, производственных и управленческих данных. Рассмотрены основные направления финансового управления, в которых применение аналитической платформы может быть наиболее значимым: бюджетирование, план-факт анализ, управление затратами, контроль денежных потоков, дебиторская задолженность и управленческая отчетность. Отдельное внимание уделено ограничениям внедрения BI-систем, связанным с качеством данных, интеграцией источников, настройкой показателей и разграничением доступа.

Ключевые слова: аналитическая платформа, Навигатор BI, бизнес-аналитика, промышленное предприятие, финансовое управление, управленческая отчетность, план-факт анализ, затраты, корпоративное хранилище данных, цифровизация.

В современных условиях промышленное предприятие функционирует в среде высокой информационной сложности. Финансовые показатели зависят не только от данных бухгалтерского учета, но и от производственных, складских, закупочных, логистических и договорных процессов. В результате финансовое управление промышленного предприятия требует обработки большого количества разнородных данных, поступающих из ERP-систем, бухгалтерских программ, производственных систем, складского учета, CRM-систем и файловых источников.

Традиционный подход к финансовой аналитике, основанный на ручной консолидации отчетности и использовании таблиц Excel, становится недостаточным для оперативного управления. Такие инструменты позволяют решать отдельные учетные задачи, однако плохо подходят для регулярного анализа затрат, контроля денежных потоков, план-факт анализа и формирования управленческой отчетности в разрезе центров финансовой ответственности. Задержка в получении данных приводит к тому, что управленческие решения принимаются на основе уже устаревшей информации.

В этих условиях возрастает роль BI-систем и аналитических платформ, обеспечивающих сбор, обработку, визуализацию и интерпретацию данных для принятия управленческих решений. BI-платформа позволяет перейти от разрозненных отчетов к единому аналитическому контуру, в котором финансовые показатели рассматриваются во взаимосвязи с произ-

водственными и операционными данными. Это особенно важно для промышленных предприятий, где финансовый результат формируется под влиянием себестоимости, загрузки мощностей, закупочных цен, сроков производства и оборачиваемости запасов.

В работах Н.А. Исаевой и О.И. Калининского перспективные экономические возможности предприятия рассматриваются как объект управленческого воздействия, требующий системной диагностики и анализа [1]. В контексте настоящего исследования это позволяет рассматривать аналитическую платформу не только как инструмент автоматизации отчетности, но и как средство информационной поддержки управления экономическими возможностями предприятия. Если финансовые показатели отображаются в динамике, в разрезе подразделений, продукции и центров ответственности, руководство получает возможность не только фиксировать результаты, но и выявлять резервы развития.

Целью статьи является изучение возможностей аналитической платформы Навигатор ВІ в сфере управления финансами промышленного предприятия. Для достижения цели необходимо рассмотреть особенности финансового управления промышленного предприятия, определить ключевые финансовые процессы, которые могут быть поддержаны ВІ-платформой, сопоставить функции Навигатор ВІ с задачами финансового управления, а также выявить ограничения и риски внедрения такой платформы.

Финансовое управление промышленного предприятия как объект ВІ-аналитики

Финансовое управление промышленного предприятия представляет собой комплексную систему планирования, учета, контроля, анализа и принятия решений, направленную на обеспечение финансовой устойчивости и повышение результативности деятельности организации. В отличие от предприятий сферы услуг, промышленная организация характеризуется высокой капиталоемкостью, сложной структурой затрат, длительным производственным циклом и зависимостью финансового результата от большого числа операционных факторов.

К ключевым задачам финансового управления промышленного предприятия относятся бюджетирование, план-факт анализ, управление затратами, контроль денежных потоков, управление дебиторской и кредиторской задолженностью, анализ финансового результата, контроль капитальных затрат и формирование управленческой отчетности. Каждая из этих задач требует не только корректных финансовых данных, но и связи с производственными и операционными показателями.

Например, анализ себестоимости промышленной продукции невозможен без учета данных о расходе материалов, загрузке оборудования, объеме незавершенного производства, складских остатках и структуре прямых и косвенных затрат. Контроль денежных потоков требует сопоставления данных о платежном календаре, банковских выписках, договорах, графиках оплат и задолженности контрагентов. Управление дебиторской

задолженностью связано с анализом сроков оплаты, условий договоров, отгрузок и платежной дисциплины клиентов.

Таким образом, финансовое управление промышленного предприятия является межфункциональной областью, в которой пересекаются финансы, производство, логистика, снабжение и продажи. Именно поэтому BI-платформа может быть полезна не только как средство построения графиков, но и как инструмент интеграции данных из разных функциональных областей.

Таблица 1 – Задачи финансового управления
промышленного предприятия и аналитические потребности

Задача финансового управления	Основные источники данных	Ключевые показатели	Управленческое решение
Бюджетирование и план-факт анализ	ERP, 1C, бюджетные модели, Excel-шаблоны ЦФО	отклонение план/факт, % исполнения бюджета, EBITDA	корректировка бюджета, пересмотр лимитов, уточнение производственной программы
Управление затратами и себестоимостью	ERP, MES, WMS, бухгалтерский учет	себестоимость единицы продукции, доля материальных затрат, OPEX	оптимизация затрат, пересмотр норм расхода, изменение поставщиков
Управление финансовым результатом	ERP, бухгалтерский учет, данные продаж	выручка, валовая прибыль, EBITDA, чистая прибыль, рентабельность	изменение ценовой политики, корректировка ассортимента, управление маржинальностью
Контроль денежных потоков	казначейская система, банк, платежный календарь	остаток денежных средств, чистый денежный поток, кассовый разрыв	перенос платежей, привлечение финансирования, управление ликвидностью
Управление дебиторской задолженностью	ERP, CRM, договоры, счета	DSO, просроченная задолженность, оборачиваемость ДЗ	блокировка отгрузок, претензионная работа, изменение условий оплаты
Управленческая отчетность	ERP, бухгалтерия, производство, склад, Excel	P&L, ДДС, баланс, KPI по ЦФО	подготовка отчетности для руководства, оценка эффективности подразделений

Из таблицы видно, что большинство финансовых задач невозможно решать только на уровне бухгалтерских данных. Для качественного анализа необходима единая информационная модель, объединяющая финансовые, производственные и управленческие показатели. Поэтому внедрение BI-платформы должно рассматриваться вместе с вопросами архитектуры данных, качества справочников и регламентации показателей.

Информационная основа применения BI-платформы

Применение аналитической платформы в финансовом управлении промышленного предприятия требует предварительно подготовленной информационной архитектуры. В общем виде такая архитектура включает источники данных, процессы ETL/ELT, корпоративное хранилище данных или витрины данных, BI-платформу и конечных пользователей.

ETL- и ELT-процессы являются важной частью современной архитектуры обработки данных, так как обеспечивают извлечение информации из различных источников, ее преобразование и загрузку в целевые системы [4]. Для промышленного предприятия это особенно актуально, поскольку данные могут поступать из систем разного назначения: ERP, 1C, MES, WMS, CRM, казначейских систем и файловых источников. Без предварительной обработки такие данные часто имеют разные форматы, различные справочники, дубли и противоречия.

Корпоративное хранилище данных выступает основой для последующей аналитики. Оно позволяет хранить исторические данные, формировать единую версию показателей и создавать тематические витрины для отдельных направлений: финансы, производство, продажи, логистика. В исследовании О. С. Дробковой подчеркивается, что корпоративное хранилище данных является основой для повышения обоснованности принятия управленческих решений в крупных промышленных компаниях [5].

Для финансового управления особенно важны такие характеристики данных, как полнота, достоверность, актуальность, сопоставимость и защищенность. Низкое качество данных может привести к искажению себестоимости, ошибкам план-факт анализа, неверному расчету денежных потоков и некорректной оценке финансового результата. Поэтому BI-платформа не может рассматриваться отдельно от процессов управления данными. Она показывает результаты настолько качественно, насколько качественно подготовлены исходные данные.

Возможности аналитической платформы Навигатор BI

Навигатор BI относится к классу корпоративных платформ бизнес-аналитики и визуализации данных. В открытых материалах платформа описывается как российское BI-решение, предназначенное для создания интерактивных дашбордов, управленческой отчетности, анализа показателей и мониторинга отклонений. Для темы настоящей статьи важны не маркетинговые характеристики продукта, а те функции, которые могут быть связаны с задачами финансового управления промышленного предприятия.

К числу верифицированных возможностей Навигатор BI относятся построение интерактивных дашбордов, работа с управленческой отчетностью, автоматический контроль выполнения плана или прогноза, оповещения об отклонениях, подключение к различным источникам данных, загрузка файлов, настройка прав доступа и ролевая модель безопасности. В официальном описании функциональных характеристик платформы указывается возможность интегрированной управленческой отчетности в одном окне, онлайн-аналитики показателей и управления по отклонениям [3].

Для финансового управления промышленного предприятия эти возможности могут быть применены в нескольких направлениях.

Во-первых, платформа может использоваться для визуализации ключевых финансовых показателей. Руководство предприятия, финансовый директор и руководители ЦФО могут видеть выручку, затраты, прибыль, денежные потоки и отклонения от плана в едином интерфейсе. Это снижает зависимость от отдельных Excel-отчетов и повышает прозрачность управленческой информации.

Во-вторых, Навигатор ВІ может использоваться для план-факт анализа. Возможность автоматического контроля плана или прогноза и оповещений об отклонениях позволяет быстрее выявлять перерасход бюджета, снижение выручки, рост себестоимости или угрозу кассового разрыва. Для промышленного предприятия это особенно важно, поскольку отклонения могут возникать как на финансовом, так и на производственном уровне.

В-третьих, платформа может применяться для управления затратами. При наличии подготовленных витрин данных можно анализировать структуру затрат по статьям, цехам, продуктовым направлениям, центрам ответственности и периодам. Такой анализ позволяет выявлять непроизводительные расходы, зоны роста себестоимости и отклонения от нормативов.

В-четвертых, Навигатор ВІ может быть использован для контроля денежных потоков и дебиторской задолженности. Финансовые дашборды позволяют отображать остатки денежных средств, поступления, платежи, просроченную задолженность, сроки оплаты и риски кассовых разрывов. Это повышает оперативность казначейской функции и позволяет быстрее принимать решения по платежному календарю.

Таблица 2 – Возможности Навигатор ВІ в контексте финансового управления промышленного предприятия

Возможность Навигатор ВІ	Финансовый процесс	Ожидаемый результат	Ограничение применения
Интерактивные дашборды	управленческая отчетность, финансовый мониторинг	наглядное представление КРІ для руководства	требуется корректная модель показателей
Управленческая отчетность в одном окне	P&L, ДДС, баланс, отчеты по ЦФО	снижение разрозненности отчетности	необходима интеграция источников данных
Контроль выполнения плана/прогноза	бюджетирование, план-факт анализ	оперативное выявление отклонений	важно заранее определить правила расчета отклонений
Оповещения об отклонениях	контроль затрат, денежных потоков, бюджета	ускорение управленческой реакции	требуются пороговые значения и ответственные лица
Подключение к СУБД и файловым источникам	сбор фактических и плановых данных	консолидация данных из разных систем	прямые коннекторы к отдельным системам могут требовать промежуточного слоя

Ролевая модель и разграничение доступа	работа с финансовой и коммерческой информацией	защита чувствительных данных	требуется регулярный аудит прав доступа
Загрузка Excel/CSV	загрузка планов, нормативов, корректировок	возможность использовать существующие данные	ручная загрузка повышает риск ошибок
Мобильный и веб-доступ	оперативный контроль руководством	доступ к финансовым показателям вне рабочего места	требуется обеспечение информационной безопасности

Сопоставление функций платформы с финансовыми процессами показывает, что наибольшую прикладную значимость Навигатор ВІ может иметь в задачах управленческой отчетности, план-факт анализа, мониторинга затрат, контроля денежных потоков и анализа дебиторской задолженности. При этом корректно говорить именно о возможностях применения платформы, а не о доказанном эффекте внедрения на конкретном промышленном предприятии, если такой кейс не был специально исследован.

Ожидаемые эффекты применения

Ожидаемые эффекты внедрения ВІ-платформы в финансовое управление промышленного предприятия можно разделить на организационные, информационные и управленческие.

К организационным эффектам относится снижение трудозатрат на подготовку отчетности. Если данные загружаются в витрины автоматически, финансовые аналитики меньше времени тратят на сбор, ручную сверку и копирование данных, а больше – на анализ причин отклонений и подготовку управленческих выводов.

К информационным эффектам относится повышение прозрачности финансовых показателей. ВІ-платформа позволяет создать единый интерфейс для анализа данных, снизить расхождения между отчетами подразделений и обеспечить единое понимание КРІ. Это особенно важно для промышленных предприятий с несколькими площадками, цехами или центрами ответственности.

К управленческим эффектам относится ускорение принятия решений. Руководство получает возможность видеть отклонения от бюджета, изменения затрат, проблемы с денежными потоками и рост дебиторской задолженности быстрее, чем при традиционном цикле подготовки отчетности. Это позволяет перейти от реактивного анализа завершившегося периода к более оперативному управлению.

Однако указанные эффекты не возникают автоматически после установки ВІ-платформы. Их достижение зависит от качества исходных данных, зрелости учетных систем, наличия корпоративного хранилища данных, согласованности справочников и готовности пользователей работать с новой аналитической средой.

Риски и ограничения внедрения

Внедрение Навигатор ВІ в финансовое управление промышленного предприятия связано не только с техническими, но и с организационными рисками. В работе Н. А. Исаевой и В. С. Петровой рассматривается оценка рисков внедрения автоматизированных систем на основе данных 24 промышленных организаций [6]. В контексте настоящей статьи данный подход важен тем, что внедрение ВІ-платформы также относится к проектам автоматизации управленческой деятельности и требует предварительной оценки рисков.

Первым ключевым риском является низкое качество исходных данных. Если в учетных системах присутствуют дубли, пропуски, разные справочники контрагентов, статей затрат и центров ответственности, ВІ-платформа лишь визуализирует уже существующие проблемы. В этом случае пользователь получает красивые графики, но не достоверную аналитику.

Второй риск связан с несогласованностью методик расчета показателей. Например, показатель EBITDA, маржинальность, себестоимость или свободный денежный поток могут рассчитываться по-разному в разных подразделениях. Без единого словаря KPI и утвержденных формул ВІ-система может привести не к единой версии данных, а к усилению методологических противоречий.

Третий риск – ошибки интеграции. Неправильно настроенные ETL-процессы могут привести к потере части операций, задвоению данных, задержкам обновления или некорректному сопоставлению справочников. Для финансовых данных такие ошибки особенно критичны, поскольку они напрямую влияют на управленческие решения.

Четвертый риск связан с информационной безопасностью. Финансовые данные могут содержать сведения о выручке, маржинальности, контрагентах, задолженности, платежах и коммерческих условиях. Поэтому при внедрении ВІ-платформы необходимы ролевая модель доступа, разграничение прав по подразделениям и регулярный аудит действий пользователей.

Пятый риск – сопротивление пользователей. Если финансовая служба и руководители подразделений не участвуют в постановке требований, дашборды могут оказаться формальными и неиспользуемыми. В этом случае предприятие продолжит вести параллельные Excel-отчеты, а внедрение ВІ не даст ожидаемого управленческого эффекта.

Снижение перечисленных рисков требует поэтапного подхода к внедрению. На первом этапе необходимо провести инвентаризацию источников данных и определить ключевые финансовые показатели. На втором этапе следует согласовать справочники, владельцев данных и формулы KPI. На третьем этапе целесообразно запустить пилотный контур, например для план-факт анализа или контроля затрат. Только после проверки качества данных и востребованности отчетов можно масштабировать решение на другие финансовые процессы.

Заключение

Проведенное исследование показывает, что аналитическая платформа Навигатор ВІ обладает набором функций, применимых к задачам финансового управления промышленного предприятия. Наиболее значимыми возможностями являются формирование интерактивных дашбордов, интегрированная управленческая отчетность, контроль отклонений, работа с различными источниками данных и разграничение доступа к информации.

В сфере финансового управления промышленного предприятия платформа может быть использована для поддержки бюджетирования, план-факт анализа, управления затратами, контроля денежных потоков, анализа дебиторской задолженности и формирования управленческой отчетности. При этом наибольший эффект возможен при наличии подготовленной архитектуры данных: корпоративного хранилища или витрин, настроенных ETL-процессов, единых справочников и утвержденной методики расчета финансовых показателей.

Важно подчеркнуть, что Навигатор ВІ не заменяет ERP, бухгалтерские или казначейские системы. Его роль заключается в аналитической обработке и визуализации данных, уже накопленных в корпоративной информационной среде. Поэтому внедрение платформы должно рассматриваться как часть более широкой системы цифровизации финансового управления.

Основными ограничениями внедрения являются качество исходных данных, несогласованность справочников, ошибки интеграции, неправильная постановка KPI, риски информационной безопасности и сопротивление пользователей. Следовательно, успешное применение Навигатор ВІ зависит не только от функциональных возможностей платформы, но и от зрелости процессов управления данными на предприятии.

Таким образом, аналитическая платформа Навигатор ВІ может рассматриваться как перспективный инструмент повышения прозрачности и обоснованности финансового управления промышленного предприятия. Ее практическая значимость заключается в возможности объединения финансовых и операционных данных в едином аналитическом контуре, что создает условия для более оперативного и качественного принятия управленческих решений.

Список использованных источников

1. Исаева Н.А., Калинин О.И. Перспективные экономические возможности предприятия: сущность и управление: монография. – Москва: Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», 2024. – 192 с. – ISBN 978-5-907833-05-0. – EDN AJYUDR.
2. Цуканова О.А., Ярская А.А. Сущность и роль ВІ-систем в современной экономике // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент». – 2021. – № 2. – DOI: 10.17586/2310-1172-2021-14-2-79-85.
3. ПАО «Сбербанк». Описание функциональных характеристик ПО Навигатор ВІ. Версия документа: 2024-12-24. – URL: <https://navigator.sberanalytics.ru/files/description-of-functional-characteristics.pdf> (дата обращения: 17.05.2026).

4. Битченков Д.И., Злобина М.С., Ермаков С.Г. Ключевые проблемы внедрения ETL/ELT-процессов и методы их преодоления // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2025. – № 3 (43). – С. 41–48. – DOI: 10.20295/2413-2527-2025-343-41-48.
5. Дробкова О.С. Применение корпоративного хранилища данных для повышения обоснованности принятия управленческих решений в крупных промышленных компаниях // Сборник научных трудов. – 2024. – С. 281–288.
6. Исаева Н.А., Петрова В.С. Оценка рисков внедрения автоматизированных систем: доработка и адаптация методики на основе данных 24 промышленных организаций // Развитие экономических систем: теория, методология, практика: монография. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2025. – С. 180–193. – EDN LGCOUN.
7. ПАО «Сбербанк». Навигатор BI: руководство по установке. – URL: https://navigator.sberanalytics.ru/files/installation-instructions_v1.pdf (дата обращения: 17.05.2026).
8. ПАО «Сбербанк». Навигатор BI: руководство администратора. – URL: https://datafinder.ru/files/navigator-bi/Rukovodstvo_administratora_2cf7c68603.pdf (дата обращения: 17.05.2026).
9. Гудзь С.С., Цуканова О.А. Рынок BI-технологий в России: анализ перехода на отечественные решения в контексте импортозамещения // Бизнес-информатика. – 2025. – Т. 19. – № 3. – С. 85–100. – DOI: 10.17323/2587-814X.2025.3.85.100.
10. Хренов Р.Н., Синиченко О.А. Цифровизация управления финансовыми ресурсами предприятия // Вектор экономики. – 2025. – № 7. – URL: <https://vectoreconomy.ru> (дата обращения: 17.05.2026).

STUDYING THE POSSIBILITIES OF THE NAVIGATOR BI ANALYTICAL PLATFORM IN THE FIELD OF FINANCIAL MANAGEMENT OF AN INDUSTRIAL ENTERPRISE

M. Barabash, E. Kazantseva, V. Sychikov, D. Fedorina

*National University of Science and Technology MISIS,
Moscow, Russia*

The article examines the possibilities of using the Navigator BI analytical platform in the field of financial management of an industrial enterprise. The relevance of BI platforms for consolidating financial, production and management data is substantiated. The main areas of financial management where the use of an analytical platform may be most significant are considered: budgeting, plan-fact analysis, cost management, cash flow control, accounts receivable analysis and management reporting. Special attention is paid to the limitations of BI implementation related to data quality, integration of sources, KPI configuration and access control.

Keywords: *analytical platform, Navigator BI, business intelligence, industrial enterprise, financial management, management reporting, plan-fact analysis, costs, data warehouse, digitalization.*

СОСТОЯНИЕ ОСНОВНЫХ ФОНДОВ ЭНЕРГЕТИКИ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН 2024-2025

Е.В. Баскакова, Р.А. Бурганов

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

В статье рассмотрено состояние основных фондов энергетики Республики Татарстан в 2024–2025 годах с анализом динамики потребления и выработки электроэнергии, а также развития сетевой инфраструктуры. Показано, что энергосистема региона сохраняет устойчивость при росте нагрузок и постепенно модернизируется, обеспечивая стабильное функционирование в условиях увеличивающегося спроса.

Ключевые слова: энергетика, энергосистема Республики Татарстан, основные фонды, сетевой комплекс, энергетическая система, электрические сети, энергобаланс.

Состояние основных фондов энергетики Республики Татарстан в период 2024–2025 годов характеризуется устойчивым ростом нагрузки, заметными изменениями в динамике выработки и потребления электроэнергии, а также усиливающимися требованиями к модернизации инфраструктуры. На основе данных профильных источников проанализировано развитие электроэнергетической системы республики, динамика мощностей генерации, сетевых фондов и потребления энергии крупными потребителями, а также влияние этих факторов на эксплуатационные условия основных энергетических фондов.

Энергосистема Республики Татарстан входит в состав Единой энергосистемы России, охватывая широкую сеть генерации и распределения электроэнергии с опорой на тепловые электростанции, гидроэлектростанции и участки «неоптовой» генерации у промышленных предприятий. По итогам 2024 года объем выработки электроэнергии в республике превысил 31 млрд кВт·ч, что на 10,8% выше показателя 2023 года, а потребление электроэнергии в 2024 году увеличилось примерно на 5,1% по сравнению с предыдущим годом. Рост выработки оказался выше среднероссийских темпов развития, а прирост электропотребления стал одним из лучших за последние годы.

Потребление электроэнергии в Татарстане в 2025 году продолжило устойчивый рост: к концу года наблюдалось увеличение общего объема потребления на примерно 5,5%, или на 1,9 млрд кВт·ч по сравнению с 2024 годом. В расчете с учетом влияния температурных условий рост составил до 6,9%. При этом выработка электроэнергии в 2025 году фактически сохранилась на уровне предыдущего года, сократившись всего на 0,7% несмотря на высокий базис 2024 года.

Основная нагрузка на энергосистему Татарстана связана с промышленным сектором: энергетические объемы потребления растут за счет

предприятий нефтегазового и химического комплекса, а также дата-центров и других крупных промышленных потребителей. В конкретные летние и зимние периоды 2025 года фиксировались рекордные значения суточного потребления мощности. Так, весной и летом 2025 года пиковые нагрузки в республике достигали уровней выше 4500 МВт, а отдельные максимумы мощности были зафиксированы на уровне 4580 МВт и более. Рост пиковых нагрузок отражает как промышленную активность, так и влияние климатических факторов на потребление энергии [1].

Важным индикатором общего состояния энергетических фондов является динамика потребления электроэнергии в разрезе месяцев: в июне 2025 года общий объем электрической энергии, потребленной в республике, превысил 2,8 млрд кВт·ч, что выше уровня аналогичного периода прошлого года на 8,9%. В мае 2025 года этот показатель достигал почти 2,9 млрд кВт·ч с ростом на 7,3%. Такие регулярные увеличения потребления отражают стабильно высокий спрос на электроэнергию со стороны промышленности и бытовых потребителей.

Стоит отметить и историческую тенденцию роста потребления электроэнергии: за последние десять лет (с 2015 по 2025 год) объем потребления электрической энергии в Татарстане увеличился примерно на 30%, а установленная мощность энергосистемы выросла на 21%. За тот же период выработка электроэнергии увеличилась на 41%. Объем инвестиций в модернизацию сетевых фондов и инфраструктуры энергосистемы за последние годы превысил 170 млрд рублей, что указывает на масштабную работу по обновлению основных энергетических фондов [2].

За тот же период выработка электроэнергии увеличилась на 41%, что указывает на повышение интенсивности использования существующих генерирующих мощностей и более эффективную загрузку энергетических объектов. Такой рост выработки при относительно более умеренном увеличении установленной мощности может свидетельствовать о повышении коэффициента использования оборудования и оптимизации режимов работы энергосистемы.

Дополнительным показателем развития энергетической инфраструктуры выступает объем инвестиций в модернизацию сетевых фондов и инфраструктуры энергосистемы. За последние годы суммарный объем вложений превысил 170 млрд рублей, что демонстрирует масштабную работу по обновлению основных энергетических фондов. Данные инвестиции направлялись на реконструкцию линий электропередачи, обновление подстанционного оборудования, повышение надежности распределительных сетей и снижение технологических потерь.

В совокупности представленные показатели формируют картину устойчиво развивающейся энергосистемы с возрастающей нагрузкой и параллельным ростом производственных возможностей. При этом сохраняется необходимость постоянного обновления инфраструктуры, поскольку увеличение потребления требует не только роста генерации, но и повышения пропускной способности сетевого комплекса[3].

Несмотря на рост потребления, резервы энергосистемы, созданные ранее, постепенно расходуются, что требует активного внимания к модернизации и расширению мощностей. Директор Регионального диспетчерского управления энергосистемы Татарстана отмечал, что на фоне увеличения нагрузки эксплуатационные резервные возможности постепенно сокращаются, что увеличивает значимость оперативного управления и планирования модернизационных работ.

Генерация электроэнергии в регионе по-прежнему строится на базе тепловых электростанций и гидроэнергетических объектов. Нижнекамская гидроэлектростанция и Заинская ГРЭС внесли значительный вклад в рост выработки энергии в 2024 году, прибавив соответственно до 30% и 25% к своим показателям. В 2025 году ТЭС поддерживали общую генерацию на уровне предыдущего года, несмотря на рост потребления, благодаря эффективности эксплуатации и оптимизации работы оборудования.

Однако структура генерации в республике остается скромной по части возобновляемых источников энергии. Пока доля ветровых и солнечных установок в общем балансе производства электроэнергии невелика, но планы по внедрению возобновляемых мощностей включены в долгосрочные энергостратегии. Эти направления рассматриваются как способ уменьшения углеродной нагрузки на энергосистему и повышения устойчивости к внешним факторам [1].

На уровне инфраструктуры ведётся работа по реконструкции подстанций, линий электропередачи, модернизации автоматизированных систем управления сетью. Программы развития энергетической системы предусматривают повышение надежности сетевого хозяйства, снижение технических потерь и улучшение качества электроснабжения, что является ответом на растущие объемы потребления и более сложные рабочие режимы.

В широком контексте, Энергосистема Республики Татарстан остается устойчивой к текущим вызовам, способной обеспечивать растущий спрос на электроэнергию и реагировать на новые нагрузки. В целом, за период 2024–2025 годов произошёл заметный рост потребления электрической энергии при сохранении способности генерации обеспечивать этот рост, а также реализация комплексных мер по модернизации сетевой инфраструктуры. Вследствие этих факторов сформирована база для дальнейшего развития энергетической системы и повышения её эффективности [4].

Таким образом, можно отметить, что основные фонды энергетики Татарстана выдерживают испытания рыночными, техническими и климатическими вызовами, а динамика позитивных изменений указывает на устойчивую работу комплекса. Это позволяет надеяться, что планируемые меры по модернизации, расширению генерирующих мощностей и интеграции современных технологий будут способствовать ещё более устойчивому развитию энергетики региона в ближайшие годы.

Список использованных источников

1. АО «Системный оператор Единой энергетической системы». Обосновывающие материалы. Схема и программа развития электроэнергетических систем России на 2026–2031 годы: Энергосистема Республики Татарстан [Электронный ресурс] / АО «СО ЕЭС». – Казань, 2025. URL: https://www.soups.ru/fileadmin/files/company/future_plan/public_discussion/2025/support_mat/55_Respublika_Tatarstan.pdf
2. Бурганов Р.А. Экономика отрасли (энергетика): учебник. – Казань: КГЭУ, 2023. – 115 с.
3. Большаков А.В. Резервы энергосистемы Татарстана, созданные ранее, потихоньку выбираются [Электронный ресурс] / «Татар-информ», 13.01.2025. – URL: <https://www.tatar-inform.ru/news/bolsakov-rezervy-energositemytatarstanasozdannyeraneepotixonkuvybirayutsya5969757?ysclid=mm7g8a3j6p750555808>
4. Министерство экономики Республики Татарстан. Об итогах деятельности Министерства экономики Республики Татарстан за 2024 год [Электронный ресурс] / Минэкономики РТ. – Казань, 27.03.2025. – URL: [https://mert.tatarstan.ru/file/mert/File/Об%20итогах%20деятельности%20Министерства%20экономики%20РТ%20за%202024%20год\(1\).pdf?ysclid=mm7g7205iz438190105](https://mert.tatarstan.ru/file/mert/File/Об%20итогах%20деятельности%20Министерства%20экономики%20РТ%20за%202024%20год(1).pdf?ysclid=mm7g7205iz438190105)

STATE OF FIXED ASSETS OF THE ENERGY SECTOR OF THE REPUBLIC OF TATARSTAN 2024-2025

E.V. Baskakova, R.A. Burganov

*azan State Power Engineering University,
Kazan, Russia*

The article considers the state of the fixed assets of the energy sector of the Republic of Tatarstan in 2024–2025 with an analysis of the dynamics of electricity consumption and generation, as well as the development of grid infrastructure. It is shown that the energy system of the region remains stable in the face of increasing loads and is gradually being modernized, ensuring stable operation in the face of increasing demand.

Keywords: *energy, energy system of the Republic of Tatarstan, fixed assets, grid complex, energy system, electric grids, energy balance.*

УДК 631.15.01

РАЗРАБОТКА ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА СЕРДЕЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ОСНОВЕ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

А.Р. Бахтевалиев, К.Х. Гильфанов

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

В статье рассматриваются вопросы разработки персонализированной системы мониторинга сердечной деятельности пациента на основе регистрации электрокардиографических сигналов с использованием беспроводных сенсорных

устройств и автоматизированных методов обработки данных. Проанализированы современные тенденции развития телемедицинских систем, архитектура носимых кардиомониторинговых решений и методы интеллектуального анализа биомедицинских сигналов. Особое внимание уделено вопросам надежности передачи данных, энергоэффективности сенсорных модулей и применению алгоритмов машинного обучения для автоматического выявления отклонений в работе сердца.

Ключевые слова: электрокардиография, мониторинг здоровья, беспроводные сенсоры, телемедицина, обработка сигналов, интеллектуальный анализ данных.

В условиях активной цифровизации системы здравоохранения и внедрения информационных технологий в медицинскую практику особую актуальность приобретает задача непрерывного и объективного мониторинга физиологического состояния человека. Одним из ключевых направлений современной медицины является развитие методов ранней диагностики и профилактики заболеваний, основанных на длительном наблюдении за показателями жизнедеятельности организма. Сердечно-сосудистые заболевания на протяжении многих лет занимают лидирующие позиции в структуре заболеваемости и смертности населения во всем мире, что обуславливает необходимость разработки эффективных средств для своевременного выявления функциональных нарушений и постоянного контроля работы сердечно-сосудистой системы.

Электрокардиография является одним из наиболее информативных, неинвазивных и доступных методов диагностики функционального состояния сердца. Анализ электрокардиографических сигналов позволяет выявлять широкий спектр патологий, включая аритмии, ишемические изменения, нарушения проводимости и другие отклонения сердечной деятельности. Однако традиционные методы регистрации ЭКГ, как правило, ограничены условиями стационарного или амбулаторного обследования и не обеспечивают возможность длительного мониторинга пациента в условиях его повседневной активности. Кратковременная регистрация электрокардиограммы зачастую не позволяет зафиксировать эпизодические или скрытые нарушения ритма сердца, что снижает диагностическую ценность исследования.

Развитие микроэлектроники, сенсорных технологий, встроенных вычислительных систем и беспроводной связи привело к появлению компактных носимых устройств, способных осуществлять регистрацию электрокардиографических сигналов в режиме реального времени. Использование беспроводных сенсоров обеспечивает мобильность пациента, снижает уровень физического и психологического дискомфорта, а также расширяет возможности применения ЭКГ-мониторинга вне медицинских учреждений. Такие системы позволяют осуществлять длительное наблюдение за состоянием сердечно-сосудистой системы в условиях обычной жизнедеятельности, включая физическую активность, сон и стрессовые ситуации.

Типовая персонализированная система мониторинга сердечной деятельности представляет собой комплекс аппаратных и программных средств и включает сенсорный модуль, устройства беспроводной передачи данных, вычислительную платформу для обработки информации и программное обеспечение для анализа, хранения и визуализации результатов. Сенсорный модуль, как правило, состоит из электродов для съёма биопотенциалов, аналого-цифрового преобразователя, микроконтроллера и модуля беспроводной связи. Качество регистрации ЭКГ во многом определяется характеристиками электродов, схемой усиления и точностью аналого-цифрового преобразования сигнала.

Для передачи данных в персонализированных системах мониторинга наиболее широко применяются технологии Bluetooth Low Energy и Wi-Fi, обеспечивающие оптимальное соотношение между пропускной способностью канала связи, энергопотреблением и дальностью передачи. Выбор конкретного протокола передачи данных оказывает существенное влияние на автономность устройства, стабильность соединения и возможность интеграции системы с мобильными устройствами и облачными сервисами. В условиях ограниченных энергетических ресурсов носимых устройств особое значение приобретает оптимизация режимов работы модулей связи и вычислительных компонентов.

Автоматизированная обработка электрокардиографических сигналов является неотъемлемой частью современных систем мониторинга и включает этапы предварительной фильтрации шумов и помех, нормализации сигнала, выделения характерных элементов ЭКГ, таких как зубцы Р, комплекс QRS и зубец Т, а также анализа временных и амплитудных параметров. Для повышения точности анализа применяются методы цифровой фильтрации, спектрального анализа и адаптивной обработки сигналов. Современные системы активно используют алгоритмы машинного обучения и методы искусственного интеллекта, позволяющие автоматически классифицировать электрокардиографические сигналы, распознавать аритмии и выявлять другие функциональные нарушения с высокой степенью достоверности.

Несмотря на значительный научный и практический потенциал, разработка персонализированных систем мониторинга сердечной деятельности сопряжена с рядом технических, методических и организационных сложностей. К числу основных проблем относятся обеспечение высокой достоверности измерений в условиях движения пациента, защита и конфиденциальность персональных медицинских данных, ограниченные энергетические ресурсы носимых устройств, а также необходимость соответствия требованиям нормативных документов и сертификации медицинской техники. Дополнительные сложности связаны с необходимостью адаптации алгоритмов обработки сигналов к индивидуальным физиологическим особенностям пользователя.

Таким образом, разработка персонализированной системы мониторинга сердечной деятельности на основе беспроводных сенсорных технологий и автоматизированной обработки электрокардиографических сигналов является актуальным и перспективным направлением современной телемедицины. Комплексное применение носимых сенсорных устройств, энергоэффективных беспроводных протоколов передачи данных, методов цифровой фильтрации и интеллектуального анализа ЭКГ позволяет обеспечить непрерывный контроль функционального состояния сердечно-сосудистой системы в условиях повседневной активности пациента. Индивидуальная адаптация алгоритмов обработки сигналов, использование математических моделей и методов машинного обучения повышают точность выявления патологических состояний и создают предпосылки для ранней диагностики сердечно-сосудистых заболеваний. Реализация подобных систем способствует повышению качества медицинской помощи, развитию профилактической медицины и снижению нагрузки на учреждения здравоохранения.

Список использованных источников

5. Баевский Р.М., Иванов Г.Г. Анализ вариабельности сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем. – М.: Медицина, 2015. – 256 с.
6. Бойцов С.А., Шляхто Е.В. Современные методы диагностики сердечно-сосудистых заболеваний. – СПб.: СпецЛит, 2018. – 400 с.
7. Куликов А.А., Кузнецов В.И. Беспроводные сенсорные системы в медицине // Медицинская техника. – 2021. – № 4. – С. 12–18.
8. Рябыкина Г.В., Соболев А.В. Электрокардиография: руководство для врачей. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2020. – 384 с.
9. Сергеев А.В. Телемедицина и дистанционный мониторинг пациентов. – М.: Физматлит, 2019. – 312 с.

DEVELOPMENT OF A PERSONALIZED CARDIAC MONITORING SYSTEM BASED ON WIRELESS SENSOR TECHNOLOGIES

A.R. Bakhtevaliev, K.H. Gilfanov

*Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia*

The article discusses the issues of developing a personalized system for monitoring the patient's cardiac activity based on the registration of electrocardiographic signals using wireless sensor devices and automated data processing methods. Modern trends in the development of telemedicine systems, the architecture of wearable cardiac monitoring solutions, and methods of intelligent analysis of biomedical signals are analyzed. Special attention is paid to the issues of data transmission reliability, energy efficiency of sensor modules, and the application of machine learning algorithms for the automatic detection of abnormalities in cardiac function.

Keywords: *electrocardiography, health monitoring, wireless sensors, telemedicine, signal processing, intelligent data analysis.*

РАЗРАБОТКА ВЕБ-СЕРВИСА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ОРГАНИЗАЦИИ ГРУЗОВЫХ И ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК

К.А. Белякова

*Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
г. Кемерово, Россия*

В статье рассматривается роль автомобильных перевозок как наиболее гибкого и доступного вида транспортировки. Выявлена проблема планирования у конкретного предпринимателя, связанная с неудобными способами сбора информации от клиентов. В качестве решения предложена разработка веб-сервиса с калькулятором стоимости и формой заявки, который позволит автоматизировать взаимодействие с клиентами, сократив время на согласование услуги.

Ключевые слова: *автомобильные перевозки, планирование перевозок, автоматизация, веб-сервис, разработка, калькулятор стоимости, форма заявки.*

Перевозки грузов и пассажиров – немаловажная отрасль деятельности на сегодняшний день. Предпринимателя различных сфер нужно перевезти груз, материал или сотрудников до места работы, а обычным людям – например, вещи и мебели при переезде. В классификации перевозок по виду транспорта (автомобильные, железнодорожные, водные, авиационные) наиболее распространены автомобильные, так как они самые гибкие и доступные.

Для успешного ведения бизнеса по оказанию услуги перевозки автотранспортом, требуется иметь четко выстроенную систему их организации, которая состоит из трех важных этапов: планирование, управление движением, анализ и учет результатов.

У конкретного заказчика (индивидуального предпринимателя, занимающегося перевозками) выявлена проблема: *неудобство планирования*. Ключевая потеря времени для заказчика – не километры, а согласование, так как сейчас он использует два метода сбора информации в зависимости от типа клиента.

Для *физических (частных) лиц (B2C)* используются телефонные звонки. Через «сарафанное радио» клиент находит контакт предпринимателя, озвучивает требования по перевозке, исполнитель называет цену, транспорт и уточняет детали. В случае удовлетворения обеих сторон заключается договор.

Для *юридических лиц (B2B)* предприниматель участвует в системе государственных закупок. Для бюджетных учреждений это главный способ найти товары и услуги по максимально выгодной цене. Заказчики размещают заказы с конкретными характеристиками на электронных площадках (тендер). Индивидуальный предприниматель подает заявку на участие в торге, побеждает тот, кто предложил лучшие условия исполнения контракта.

Проблема заказчика заключается в отсутствии единого места сбора информации о его работе, куда могут быть направлены частные и юридические лица для ознакомления. Из-за этого тратится значительное количе-

ство времени на многократные переговоры по телефону и на повторное описание условий в заявках на тендер.

Цель работы: *сокращение времени на передачу информации между предпринимателем и клиентами с помощью веб-сервиса.* Для реализации данной цели необходимо выполнить **следующие задачи:**

1. Сформировать требования к веб-сервису по перевозкам груза и людей.
2. Спроектировать структуру веб-сервиса.
3. Реализовать веб-сервис, позволяющий оформлять заказы на перевозки с использованием калькулятора стоимости.

Требования к веб-сервису. Важным критерием является отображение информации, которая будет полезна потенциальному клиенту при ознакомлении с деятельностью предпринимателя. А также важно реализовать функционал, позволяющий узнать приблизительную стоимость за требуемый клиенту маршрут в соответствии с прайс-листом, и предоставить возможность оформить заявку на заказ услуги перевозки. Немаловажно обеспечить безопасность, надежность и стабильность сайта ради удобного взаимодействия с ним пользователей.

Структура веб-сервиса. Клиентская часть сайта реализуется на HTML, CSS и JS. Веб-сервис представляет собой набор из *трех страниц* с простым дизайном: «Главная», «Услуги», «О нас». У каждой имеется header с навигацией и footer с адресом, контактами, графиком работы и ссылками на политику конфиденциальности, условия использования и автора сайта.

Главная страница содержит разделы, которые привлекают внимание и вкратце рассказывают, чем занимается предприниматель, что он может предложить и как с ним можно связаться. *Страница «О нас»* предоставляет более подробную информацию о предпринимателе: его имя, адрес его бизнеса, когда он был организован, контакты, график работы и нужные документы.

Ключевая страница – «Услуги». Помимо того, что она содержит информацию по тому, какие услуги оказывает предприниматель, какой транспорт он может предоставить и какова расценка за маршруты в зависимости от географии и времени, на данной странице реализован главный функционал: *калькулятор цены и формы заявки услуги.*

Калькулятор цены. При помощи JS API Яндекс Карт пользователю предоставляется интерактивная карта, на которой можно отметить маршрут, за который требуется узнать стоимость. По нажатию кнопки «Посчитать» выводится табличка с результатами, в которой указаны адреса маршрута, выбор типа перевозки (грузовая/пассажирская), длина маршрута, приблизительное время поездки и приблизительная цена за путь, которая зависит от типа перевозки и географии маршрута (по городу/межгород).

Форма заявки. Является составлением оферты. У формы два вида: для юридического лица и для физического лица. В зависимости от выбранного вида, пользователю предоставляется уникальный набор полей заполнения для передачи информации, необходимой для организации пе-

ревозки. По завершению заполнения, заявка отправляется на почту предпринимателю при помощи РНР. Данные, которые указывает пользователь, сохраняются в зашифрованном виде в базу данных MySQL.

Разработанный веб-сервис позволит сократить время на обмен информацией между клиентом и предпринимателем путем автоматизации ознакомления клиента с деятельностью заказчика сайта и обращения к предпринимателю с помощью формы заявки.

Список использованных источников

1. Грузовые перевозки: что это такое. URL: <https://vostoktransholding.ru/blog/gruzoperevozki-cto-eto-takoe/> (дата обращения: 20.04.2026).

2. Пассажирские перевозки в современном мире. URL: <https://www.tatat.ru/polezno-znat/uslugi-i-servisy/passazhirskie-perevozki-v-sovremennom-mire/> (дата обращения: 20.04.2026).

3. Что такое государственные закупки и как в них участвовать. URL: https://www.sberbank.com/ru/s_m_business/pro_business/gosudarstvennye-zakupki-osnovnye-momenty (дата обращения: 20.04.2026).

4. Фельке-Моррис, Т. Большая книга веб-дизайна / Терри Фельке-Моррис; перевод с английского Н. А. Райтмана. – Москва: Эксмо, 2012. – 608 с.

DEVELOPMENT OF A WEB SERVICE FOR AUTOMATING THE PROCESS OF ORGANIZING FREIGHT AND PASSENGER TRANSPORTATION

K.A. Belyakova

*T.F. Gorbachev State Technical University,
Kemerovo, Russia*

The article examines the role of road transportation as the most flexible and affordable type of transportation. The problem of planning for a particular entrepreneur has been identified, related to inconvenient ways of collecting information from clients. As a solution, the development of a web service with a cost calculator and an application form is proposed, which will automate interaction with customers, reducing the time needed to coordinate the service.

Keywords: road transportation, transportation planning, automation, web service, development, cost calculator, application form.

УДК 004.9:620.9

ВЛИЯНИЕ ЦИФРОВИЗАЦИИ НА ГЕНЕРАЦИЮ И УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А.И. Биктимеров, А.М. Маклецов

*Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия*

В данной работе анализируется воздействие цифровой трансформации на процессы выработки электроэнергии и управления режимами функционирования элек-

троэнергетических систем. Рассмотрены основные концепции цифровизации, Индустрии 4.0 и интернета вещей в их приложении к энергетической отрасли. Отдельное внимание уделено проблеме энергопотребления цифровой инфраструктуры, включая центры обработки данных и устройства интернета вещей. Проанализированы два противоположных вектора развития энергосистем: глобализация (модель GEIDCO) и децентрализация (концепция «Интернет энергии»). В качестве сбалансированной парадигмы предложен подход к построению энергосистемы как совокупности самобалансирующихся узлов, способных функционировать автономно и при этом гибко взаимодействовать друг с другом.

Ключевые слова: цифровизация, генерация электроэнергии, управление режимами, интернет вещей, центры обработки данных, киберфизические системы, самобалансирующиеся узлы, распределённая энергетика.

Современная электроэнергетика переживает этап глубинной перестройки, движущей силой которой выступают цифровые технологии. Этот процесс, затрагивающий все звенья – от производства энергии до её конечного потребления, коренным образом трансформирует подходы к управлению и эксплуатации энергосистем. Тем не менее, в публичных дискуссиях о цифровизации основное внимание часто уделяется экономическим и организационным аспектам, тогда как фундаментальные физические принципы работы энергетических комплексов остаются на втором плане 1.

Под цифровизацией в энергетике понимается внедрение цифровых технологий в производственные и управленческие процессы. В контексте более общей концепции Индустрии 4.0 это ведёт к формированию киберфизических систем, в которых физические объекты (генерирующие установки, сетевое оборудование) оказываются тесно интегрированы с вычислительными ресурсами и системами автоматизированного управления. Ключевую роль здесь играет интернет, обеспечивающий сбор данных в реальном времени и возможность удалённого управления оборудованием. В результате традиционные энергосистемы трансформируются в сложные многоуровневые структуры с децентрализованным принятием решений и высокой адаптивностью управления.

Одним из наиболее заметных последствий цифровизации становится резкое увеличение энергопотребления со стороны самой цифровой инфраструктуры.

Мировое энергопотребление индустрией ЦОД (центр обработки данных) оценивается примерно в 180 ГВт·ч в год, что в полтора раза превышает годовое потребление электроэнергии всей Россией и в 30 раз – потребление Москвы. Например, дата-центр компании Apple в США расходует около 70 млн кВт·ч в год – объём, сопоставимый с потреблением города с населением 10 тысяч человек 2.

Подключение миллиардов устройств – от бытовых приборов до промышленных датчиков – создаёт дополнительную, зачастую не учитываемую и слабо регулируемую нагрузку на электрические сети. По некоторым оценкам, 20 миллиардов таких устройств могут потреблять дополнительно до 10 ГВт мощности 3,4.

Этот рост энергопотребления создаёт прямую дополнительную нагрузку на генерирующие мощности, требуя их наращивания и диверсификации (в том числе за счёт распределённой генерации), а также ставит вопрос об энергоэффективности самих цифровых технологий.

Цифровизация порождает две конкурирующие между собой концепции дальнейшего развития энергосистем.

1. Глобализированная энергосистема (GEIDCO). Эта модель предполагает создание всемирной энергетической сети с мощными электростанциями на возобновляемых источниках энергии, размещёнными в удалённых районах, и их соединением с центрами потребления линиями электропередачи сверхвысокого напряжения. Данный подход ориентирован на централизованную генерацию и максимальное масштабирование.

2. «Интернет энергии» (EnergyNet). Эта концепция, напротив, базируется на децентрализации. Она рассматривает энергосистему как пиринговую (одноранговую) сеть, управление в которой осуществляется через смарт-контракты и прямые транзакции между активными потребителями («просьюмерами») и распределёнными генерирующими объектами. Архитектура IDEA включает три взаимосвязанных уровня: финансово-договорной (Transactive Energy), информационно-управляющий (интернет вещей) и физический (Neural Grid, обеспечивающий устойчивость).

Обе модели имеют свои недостатки: глобальная система оказывается уязвимой перед политическими и экономическими кризисами, тогда как децентрализованная до сих пор не обладает отработанными механизмами, гарантирующими надёжность и устойчивость энергоснабжения.

В качестве альтернативы предлагается стратегия, основанная на построении энергосистемы как объединения самобалансирующихся энергоузлов разного масштаба – от муниципального до национального уровня.

Ключевые принципы такого подхода:

- Автономность и живучесть. Каждый узел должен быть способен самостоятельно обеспечивать свои критически важные потребности в энергии, что повышает общую устойчивость системы к внешним воздействиям.

- Гибкая интеграция. Узлы могут по мере необходимости подключаться к более крупной энергосистеме для обмена мощностью либо отключаться от неё, переходя в изолированный режим работы.

- Децентрализованное управление. Управление режимами осуществляется на уровне каждого узла с использованием технологий интернета вещей и искусственного интеллекта, что позволяет оперативно реагировать на изменения генерации и потребления в реальном времени.

Данный подход позволяет объединить преимущества распределённой генерации с надёжностью, достигаемой при системной интеграции, снижая риски как чрезмерной централизации, так и полной децентрализации.

Цифровизация в сфере генерации и управления режимами электроэнергетических систем ведёт к формированию качественно новых, сложных киберфизических комплексов. Несмотря на значительный рост энергопотребления со стороны цифровой инфраструктуры, цифровые

технологии открывают возможности для перехода к более гибким, устойчивым и эффективным моделям управления. Наиболее перспективной представляется парадигма, основанная на объединении самобалансирующихся энергоузлов. Она позволяет гармонично сочетать местную автономию, развитие распределённой генерации и интеграцию в более крупные энергетические объединения, обеспечивая тем самым надёжность и безопасность энергоснабжения в условиях неопределённости.

Список использованных источников

1. Тягунов М.Г. Цифровая трансформация и энергетика // Энергетическая политика. -- 2021. -- № 9 (163). -- С. 74--85.
2. Алейник Н. Что такое цифровая трансформация и чем она отличается от цифровизации и Индустрии 4.0 // [RB.RU]. -- URL: <https://rb.ru/story/what-is-digital-transformation/>
3. Греф: интернет вещей приведет к вторжению в персональные данные людей // РИА Новости. -- URL: <https://ria.ru/20161028/1480201957.html>

THE IMPACT OF DIGITALIZATION ON THE GENERATION AND CONTROL OF ELECTRIC POWER SYSTEMS

A.I. Biktimerov, A.M. Makletsov

*Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia*

This paper analyzes the impact of digital transformation on the processes of electricity generation and control of operating modes of electric power systems. The main concepts of digitalization, Industry 4.0 and the Internet of Things in their application to the energy industry are considered. Special attention is paid to the problem of energy consumption of digital infrastructure, including data centers and Internet of Things devices. Two opposing vectors of energy system development are analyzed: globalization (the GEIDCO model) and decentralization (the «Internet of Energy» concept). An approach to building an energy system as a set of self-balancing nodes capable of functioning independently and at the same time flexibly interacting with each other is proposed as a balanced paradigm.

Keywords: digitalization, power generation, mode management, Internet of Things, data centers, cyber-physical systems, self-balancing nodes, distributed energy.

УДК 629.11

МЕТОДИКИ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ПРОТОТИПОВ

А.В. Бобровский, Е.Д. Власова, Н.И. Бажутин

*Тольяттинский государственный университет,
г. Тольятти, Россия*

Статья посвящена обзору современных и перспективных на сегодняшний день методологий минимизации или полного исключения выбросов углекислого газа на

всех стадиях создания прототипов автомобилей. Рассматриваются инновационные подходы к выбору материалов и передовые производственные технологии, позволяющие снизить энергопотребление и сократить углеродный фон.

Ключевые слова: *декарбонизация, снижение углерода, альтернативное топливо, композитные материалы.*

Решение вопроса по декарбонизации транспорта формируется в соответствии с транспортной стратегией Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года [1], в которой подчеркивается долгосрочная государственная политика в области сокращения углерода. В данной стратегии обозначен ключевой тренд к переходу на водородное топливо и развитию производства электромобилей. В частности, в докладе [2] прогнозируется снижение выбросов парниковых газов при декарбонизации автомобилей. Переход от традиционного топлива к новым видам энергоресурсов, потребление которых составит до 30% в 2035 году, потребует изменения структуры производства.

Производство автомобильных прототипов, являющееся ключевым этапом в разработке новых моделей, традиционно сопряжено с существенным углеродным следом. От использования первичных материалов и энергоемких процессов до утилизации отходов – каждый этап порождает выбросы парниковых газов. Однако, в условиях растущего экологического сознания и ужесточения регуляторных требований, перед инженерами и исследователями стоит непростая задача: разработка и внедрение методов углеродно-нейтрального производства автомобильных прототипов.

Существует целый ряд современных и перспективных методологий, позволяющих минимизировать или даже полностью исключить выбросы углекислого газа на стадии создания прототипов автомобилей. Ниже будут представлены инновационные подходы к выбору материалов и передовые производственные технологии, дающие возможность снизить энергопотребление и сократить углеродный фон. Цель данной статьи – описать методы, которые позволят автомобильной индустрии двигаться по пути устойчивого развития, не жертвуя при этом качеством в разработке новых поколений транспортных средств.

Для начала отметим различные способы сокращения углеродного следа автомобиля. Основными направлениями декарбонизации являются альтернативы традиционным видам топлива, включая биотопливо, водородное топливо и другие возобновляемые источники энергии; проводятся также исследования, сосредоточенные на разработке новых композитов из природных материалов. Обсуждаются свойства этих материалов, методы производства, области применения и экологическая выгода; рассматриваются их преимущества, недостатки, технологические вызовы и перспективы внедрения.

В ряде научных публикаций активно исследуется проблема содержания углерода в производстве автомобилей. Авторами проводится анализ существующих методик и разрабатываются новые подходы к оценке угле-

родного следа автомобильных прототипов. В работе [3] изучается необходимость учитывать все аспекты жизненного цикла продукта, который сталкивается с экономическими, экологическими, социальными и другими ограничениями. Помимо этого, отмечается зависимость экологичности продукта с процессом его создания. Например, чтобы произвести экологичный автомобиль, надо разработать и усовершенствовать процесс производства, на что придётся потратить значительную сумму бюджета компании и при этом необходимо сохранить другие параметры автомобиля (скорость, эргономичность, мощность и т. д.).

В другой работе [4] авторы рассуждают про несогласованный жизненный цикл любого продукта. Они предложили использовать модели: агрегированный индекс качества (AQI), индекс воздействия на окружающую среду (EII) и индекс социальной ответственности (SRI). Каждый индекс позволяет прогнозировать будущий результат выхода на рынок с различных сторон и показывает востребованность продукта. Модель полезна для производителей автомобилей, стремящихся к внедрению инноваций в секторе экологически чистой мобильности. Таким образом, выделяются два направления уменьшения углеродного следа в автомобилестроении: альтернативные виды топлива и возобновляемые композитные материалы. В рамках первого направления, представляющего собой альтернативные виды топлива, рассмотрим ряд перспективных разработок.

Инженеры из Кореи используют аммиак в топливной смеси для созданного ими прототипа автомобиля, благодаря которой достигается снижение угарного газа до минимума. В этой связи инженерам потребовалось изменить двигатель и выхлопную систему, чтобы противостоять коррозии выхлопов аммиачного топлива [5].

Компания «Тойота» спроектировала прототип, способный потреблять водород. Для этого они использовали автомобиль Toyota Corolla, изменив в нём двигатель. Теперь машина может использовать особую смесь для его запуска. Благодаря таким изменениям прототип производит минимальные выбросы в следствие чего цена на её обслуживание очень высокая по сравнению с обычным автомобилем, ему требуется особое топливо на водородной основе, специализированное оборудование и многое другое [6].

Что касается возобновляемых альтернативных материалов, команда студентов из итальянского университета предложила использовать монокок, сделанный из листов углеродного волокна, сложенных в сэндвич-структуру. Благодаря этому их проект гоночной машины получился очень лёгким и прочным. Но сам монокок является довольно дорогим материалом по сравнению с дешёвыми сталью и алюминием [7]. П.Н. Тимошков, А.В. Хрульков и Л.Н. Язвенко считают, что в настоящее время полимерные композитные материалы стали одними из основных конструкционных материалов в автомобилестроении. Благодаря своим свойствам они в 5 раз легче стали и в 1,8 раза легче алюминия. Использование композитов снижает массу транспортного средства на 20-25%. Однако эти материалы уступают металлу в роли несущих элементов конструкции [8].

Данные примеры показывают, какими способами люди пытаются уменьшить углеродный след у автомобиля. Они изменяют конструкцию, материалы, топливо и другие параметры. Одни влияют сильно, а другие незначительно, но каждый способ требует тщательных и продуманных изменений.

Как показал анализ литературы, проблема повышенного содержания углерода в производстве автомобильных прототипов до сих пор актуальна: автопроизводители активно ищут пути к более устойчивому развитию. Исследования в области альтернативного топлива демонстрируют потенциал аммиака и водорода в качестве более экологичных альтернатив традиционным видам топлива. Использование материалов, полученных из переработанных отходов природных и искусственно созданных источников, открывает новые возможности для снижения углеродного следа. Важно отметить, что достижение углеродной нейтральности в автомобильной индустрии требует комплексного подхода, учитывающего весь жизненный цикл продукта. Интеграция принципов устойчивого развития в процесс разработки, создание новых моделей оценки качества, воздействия на окружающую среду и социальной ответственности (AQI, EП, SRI) становятся необходимыми инструментами для производителей.

Несмотря на существующие технологические и экономические барьеры, продемонстрированные примеры указывают на явный тренд к снижению количества углерода в автомобилестроении. Дальнейшие исследования и инвестиции в экотехнологии и разработка новых производственных процессов позволят автомобильной индустрии двигаться к устойчивому будущему, сохраняя при этом конкурентоспособность и отвечая растущим экологическим требованиям.

Список использованных источников

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 29 октября 2021 г. № 3052-р «О Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года» [Электронный ресурс]. URL: <http://static.government.ru/media/files/ADKkCzp3fWO32e2yA0BhtIpyzWfHaiUa.pdf> (дата обращения: 14.05.2026).
2. Трофименко Ю.В. Сценарный прогноз декарбонизации транспортного сектора Российской Федерации – основа формирования прогрессивных технологий в транспортном секторе [Электронный ресурс]. Доклад на заседании Объединенного ученого совета Российской академии транспорта. 30 марта 2022 г. URL: <https://rosacademtrans.ru/wp-content/uploads/2022/05/Презентация-Трофименко.pdf> (дата обращения: 14.05.2026).
3. Siwiec D., Gawlik R., Pacana A. Sustainable design of products: Balancing quality, life cycle impact, and social responsibility // *Advances in Production Engineering & Management*. – 2024. – Vol. 19, No. 4. – P. 460–488. – DOI: 10.14743/apem2024.4.519. URL: https://apem-journal.org/Archives/2024/APEM19-4_460-488.pdf (дата обращения: 14.05.2026).
4. Hirz M. Sustainability Engineering Support for Automotive Development // *Computer-Aided Design and Applications*. – 2025. – Vol. 22, No. 5. – P. 947–957. –

URL: [https://cad-journal.net/files/vol_22/CAD_22\(5\)2025_947-957.pdf](https://cad-journal.net/files/vol_22/CAD_22(5)2025_947-957.pdf) (дата обращения: 14.05.2026).

5. Atchison J. The AmVeh – an ammonia fueled car from South Korea [Электронный ресурс]. 20 May 2013. URL: <https://ammoniaenergy.org/articles/the-amveh-an-ammonia-fueled-car-from-south-korea/> (дата обращения: 14.05.2026).

6. Toyota highlights its multi-technology approach to zero carbon with hydrogen combustion prototype car [Электронный ресурс]. 5 December 2022. URL: <https://media.toyota.co.uk/toyota-highlights-its-multi-technology-approach-to-zero-carbon-with-hydrogen-combustion-prototype-car/> (дата обращения: 14.05.2026).

7. Messana A, Sisca L, Ferraris A, Airale AG, de Carvalho Pinheiro H, Sanfilippo P, Carello M. From design to manufacture of a carbon fiber monocoque for a three-wheeler vehicle prototype. Materials (Basel). 2019 Jan 22;12(3):332. doi: 10.3390/ma12030332. PMID: 30678143; PMCID: PMC6384701. (дата обращения: 14.05.2026).

8. Тимошков П.Н., Хрульков А.В., Язвенко Л.Н. Композиционные материалы в автомобильной промышленности (обзор) // Труды ВИАМ. – 2017. – № 6. – С. 61-68. – URL: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=1117 (дата обращения: 14.05.2026).

METHODS OF CARBON-FREE PRODUCTION OF AUTOMOBILE PROTOTYPES

A.V. Bobrovskii, E.D. Vlasova, N.I. Bazhutin

*Togliatti State University,
Togliatti, Russia*

The article examines promising methodologies for reducing or completely eliminating carbon emissions during the production of automobile prototypes. It explores innovative approaches to material selection and advanced manufacturing technologies that reduce energy consumption and carbon footprint.

Key words: decarbonization, carbon reduction, alternative fuels, composite materials.

УДК 004.023

АВТОМАТИЗАЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ АССОРТИМЕНТА РОЗНИЧНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ В УСЛОВИЯХ СТОХАСТИЧЕСКОГО СПРОСА НА ОСНОВЕ ГИБРИДНОГО АЛГОРИТМА GO-PSO

Д.М. Большаков

*Тверской государственный технический университет,
г. Тверь, Россия*

Предложен бинарный гибридный алгоритм, объединяющий генетический алгоритм и метод роя частиц, для решения стохастической многомерной задачи о рюкзаке в задаче автоматизации формирования товарного ассортимента розничного предприятия в условиях неопределённого спроса. Пригодность особей

оценивается методом Монте-Карло с генерацией сценариев спроса. Теоретически показано, что вычислительная сложность одной эпохи алгоритма линейно зависит от размерности задачи и суммарного размера популяций, а вероятность отклонения от глобального оптимума экспоненциально убывает с ростом числа итераций. Полученные оценки подтверждают высокую масштабируемость и надёжность предложенного подхода.

Ключевые слова: гибридный алгоритм, генетический алгоритм, метод роя частиц, многомерная задача о рюкзаке, стохастический спрос, автоматизация ассортимента, вычислительная сложность

Формирование товарного ассортимента розничного предприятия в условиях неопределённого покупательского спроса сводится к стохастической многомерной задаче о рюкзаке [5]. В отличие от детерминированной постановки, прибыль от каждой товарной позиции является случайной величиной, а ресурсные ограничения (бюджет, площадь выкладки, складские ёмкости) остаются жёсткими, что требует одновременного учёта ожидаемой доходности и вероятностных рисков [3]. Точные методы для данной NP-трудной задачи при размерностях, характерных для реального ритейла, практически неприменимы, что делает востребованными приближённые алгоритмы, прежде всего метаэвристики.

В настоящей работе предлагается гибридный алгоритм, объединяющий генетический алгоритм (GA) и метод роя частиц (PSO) по принципу ко-эволюционного обмена особями. Выбор схемы мотивирован взаимодополняемостью двух парадигм: генетическая составляющая обеспечивает широкое исследование пространства решений, а роевая – быстрое уточнение перспективных областей [1, 2, 4]. Ключевой новизной подхода является встраивание процедуры стохастического оценивания пригодности особей методом Монте-Карло непосредственно в гибридную схему GA-PSO. Цель статьи – теоретическая разработка алгоритма и получение аналитических оценок его вычислительной сложности и точности применительно к задаче автоматизированного формирования ассортимента.

Формализуем задачу формирования товарного ассортимента розничного предприятия как стохастическую многомерную задачу о рюкзаке. Пусть имеется n товаров-кандидатов, каждый из которых характеризуется бинарной переменной включения в ассортимент $x_i \in \{0, 1\}, i = \overline{1, n}$. На товары наложено m ресурсных ограничений, выражаемых линейными неравенствами

$$\sum_{i=1}^n a_{ij}x_i \leq C_j, \quad j = \overline{1, m}, \quad (1)$$

где a_{ij} – расход j -го ресурса (бюджета, площади выкладки, складской ёмкости) на включение i -го товара, C_j – предельный объём j -го ресурса. В отличие от детерминированной постановки, рассмотренной в классических работах [5], прибыль от реализации i -го товара не является фиксированной

величиной, а представляет собой случайную величину ξ_i , зависящую от стохастического покупательского спроса [3].

Целевая функция задачи формулируется как математическое ожидание суммарной прибыли по всему ассортименту:

$$F(x) = E \left[\sum_{i=1}^n f_i(x_i, \xi_i) \right] \rightarrow \max_{x \in \{0,1\}^n}, \quad (2)$$

где $f_i(x_i, \xi_i)$ – прибыль, получаемая от i -го товара при условии его включения в ассортимент ($x_i = 1$) и реализации случайного спроса ξ_i . Конкретный вид функции f_i определяется выбранной моделью спроса и схемой взаимодействия с поставщиками; в рамках настоящей работы предполагается, что распределение каждой случайной величины ξ_i известно (например, задано гистограммой или параметрическим семейством распределений, оценённым по историческим данным продаж). Дополнительно может быть введено вероятностное ограничение на допустимый уровень дефицита: $P(\text{дефицит по } i\text{-му товару} > d_i^{max}) \leq \alpha_i$, однако в данной работе основное внимание уделяется безусловной оптимизации ожидаемой прибыли.

Задача (1)–(2) является NP-трудной уже в детерминированном случае ($m \geq 2$) [5], а добавление стохастичности и необходимость вычисления математического ожидания для каждой допустимой точки делают точные методы (динамическое программирование, метод ветвей и границ) практически неработоспособными при размерности nn , характерной для реальных розничных предприятий ($n = 10^2 \dots 10^4$). Данное обстоятельство мотивирует разработку приближённого алгоритма, способного за полиномиальное время находить решения с теоретически обоснованными оценками точности и вычислительной сложности. В качестве такого алгоритма в настоящей работе предлагается гибридный метод, объединяющий генетический алгоритм и метод роя частиц, адаптированный к стохастической природе целевой функции посредством имитационного моделирования (метод Монте-Карло) для оценки $F(x)$ в процессе эволюции.

Предлагаемый алгоритм построен по принципу высокоуровневой гибридизации вложением [2] и представляет собой ко-эволюционную схему, в которой параллельно функционируют две популяции: генетическая популяция P_{GA} размера N и рой частиц P_{PSO} размера M . Обмен особями между популяциями происходит через заданное число поколений, что позволяет генетической составляющей поддерживать разнообразие, а роевой – ускорять локальное уточнение решений [1].

Каждая особь (хромосома в GA или частица в PSO) представляет собой бинарный вектор $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, где $x_i = 1$, если товар i включён в ассортимент, и $x_i = 0$ в противном случае. Допустимость решения по многомерным ограничениям (1) обеспечивается на этапе вычисления пригодности с помощью механизма «жадного восстановления»: если для некото-

рой особи нарушается хотя бы одно из ограничений $\sum_i a_{ij} x_i \leq C_j$, из вектора последовательно удаляются товары с наименьшим отношением ожидаемой прибыли к «весу» по наиболее нарушенному ресурсу до тех пор, пока все ограничения не будут выполнены. Альтернативно может применяться метод штрафных функций, однако в данной работе для теоретического анализа используется восстановление, гарантирующее допустимость всех оцениваемых решений.

Целевая функция (2) содержит математическое ожидание, которое не может быть вычислено аналитически в явном виде. Поэтому пригодность особи x оценивается методом Монте-Карло: генерируется S независимых сценариев вектора спроса $\xi^{(s)} = (\xi_1^{(s)}, \dots, \xi_n^{(s)})$, $s = \overline{1, S}$, в соответствии с заданными распределениями ξ_i . Для каждого сценария вычисляется реализованная прибыль $F_s(x) = \sum_{i: x_i=1} f_i(1, \xi_i^{(s)})$. Итоговая оценка пригодности есть выборочное среднее

$$\hat{F}(x) = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S F_s(x).$$

Дисперсия этой оценки убывает пропорционально $1/S$, что позволяет при достаточно больших S (порядка $10^3 \dots 10^4$) получать надёжное сравнение особей.

В популяции P_{GA} на каждом поколении применяются стандартные операторы: турнирный отбор размера 2, односточный кроссинговер с вероятностью p_c и битовая мутация с вероятностью p_m на ген. Используется элитизм – лучшая особь текущего поколения гарантированно переходит в следующее. Размер популяции N и параметры p_c, p_m подбираются так, чтобы обеспечить баланс исследования и эксплуатации [4]. Для бинарного пространства поиска применяется бинарная версия метода роя частиц (BPSO). Каждая частица k характеризуется позицией x_k (бинарный вектор) и скоростью v_k (вещественный вектор размерности n). На каждой итерации скорость обновляется по правилу

$$v_{ki} \leftarrow wv_{ki} + c_1 r_{1i} (pBest_{ki} - x_{ki}) + c_2 r_{2i} (gBest_{ki} - x_{ki}),$$

где w – коэффициент инерции, c_1, c_2 – когнитивная и социальная константы, $r_{1i}, r_{2i} \sim U(0,1)$. Позиция обновляется с использованием сигмоидальной функции:

$$x_{ki} = \begin{cases} 1, & \text{если } rand() < s(v_{ki}), \\ 0, & \text{иначе, } s(v) = \frac{1}{1 + e^{-v}}. \end{cases}$$

Частица запоминает свою лучшую персональную позицию $pBest_k$, а рой – глобально лучшую $gBest$, определяемые по значению оценки $\hat{F}(x)$.

Обмен особями между P_{GA} и P_{PSO} выполняется каждые T поколений. Лучшие R особей генетической популяции замещают R худших частиц

роя, а глобально лучшее решение роя $gBest$, в свою очередь, вводится в генетическую популяцию, замещая её худшую особь. Такая схема обеспечивает взаимное обогащение: генетический алгоритм поставляет рою разнообразные перспективные точки для локального уточнения, а рой передаёт генетической популяции оптимизированные значения, ускоряя её сходимость [1, 2]. Число миграций и их периодичность являются управляющими параметрами алгоритма.

Вычислительная сложность одной эпохи (поколение GA + итерация PSO + обмен) составляет

$$O((N + M)nST_{sim}),$$

где N – количество особей популяции GA, M – число частиц роя PSO, S – число сценариев Монте-Карло для оценки пригодности одной особи, а T_{sim} – время генерации одного сценария спроса на один товар.

Таким образом, время работы алгоритма линейно зависит от числа товаров n , количества сценариев Монте-Карло S и суммарного размера двух популяций $N + M$. Это отличает предложенный подход от точных методов решения задачи о рюкзаке, вычислительные затраты которых растут экспоненциально с ростом размерности n [5]. Полученная оценка подтверждает высокую масштабируемость алгоритма для практических задач формирования ассортимента с большим числом товарных позиций.

Точность получаемого решения определяется двумя факторами: точностью стохастической оценки пригодности и сходимостью метаэвристики. Ошибка выборочного среднего $\hat{F}(x)$ относительно истинного $F(x)$ убывает как $O(1/\sqrt{S})$ в силу центральной предельной теоремы, поэтому выбор $S = 1000 \dots 2000$ обеспечивает приемлемую погрешность сравнения особей. Сходимость гибридной популяции к окрестности глобального оптимума может быть обоснована опорой на классические результаты для элитных генетических алгоритмов [4] и метода роя частиц. При разумных значениях параметров (достаточный размер популяций, не слишком агрессивная мутация) вероятность того, что алгоритм не посетит точку с целевым значением в ε -окрестности глобального оптимума за t итераций, экспоненциально убывает с ростом t :

$$P(F(x_{best}^{(t)}) < F^* - \varepsilon) \leq C \cdot \exp(-\alpha t),$$

где константы C и α зависят от размерности, параметров алгоритма и характеристик ландшафта задачи. Гибридная схема, совмещающая глобальный поиск GA и локальную ускоряющую компоненту PSO, обеспечивает более высокую скорость убывания этой вероятности по сравнению с чистыми алгоритмами [1, 2]. Таким образом, предложенный гибрид теоретически гарантирует нахождение рационального решения с контролируемыми затратами времени и высокой надёжностью.

Разработан бинарный гибридный алгоритм GA-PSO, адаптированный к решению стохастической многомерной задачи о рюкзаке при формировании товарного ассортимента. Теоретически показано, что вычислительная сложность одной эпохи алгоритма линейно зависит от размерности задачи, числа сценариев Монте-Карло и суммарного размера популяций, что обеспечивает масштабируемость на практически значимые размерности в отличие от экспоненциальных точных методов. Получены аналитические оценки точности, демонстрирующие экспоненциальное убывание вероятности отклонения от глобального оптимума с ростом числа итераций, причём гибридная схема обеспечивает более высокую скорость сходимости по сравнению с чистыми GA и PSO. Направлением дальнейших исследований является экспериментальная верификация полученных теоретических оценок на реальных данных розничных предприятий и адаптация алгоритма к динамически обновляемым прогнозам спроса.

Список использованных источников

1. Лебедев, Б.К. Распределение ресурсов на основе гибридных моделей речевого интеллекта/ Б.К. Лебедев, О.Б. Лебедев, Е.М. Лебедева // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2017. – Т. 17, № 6. – С. 1063–1073.
2. Полупанова, Е.Е. Популяционный алгоритм решения задачи коммивояжера / Е.Е. Полупанова, А.С. Поляков // Системный администратор. – 2021. – № 6. – С. 114–120.
3. Истомина, А.А. Задача формирования оптимального ассортимента и товарных запасов в розничной торговле в условиях неопределенности/ А.А. Истомина, В.Я. Бадеников, А.Л. Истомин // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2017. – № 2. – С. 105–116.
4. Еремеев А.В. Генетический алгоритм для задачи о покрытии/ А.В. Еремеев // Дискретный анализ и исследование операций. Сер. 2. – 2000. – Т. 7, № 1. – С. 47–60.
5. Гордеев Э.Н. О некоторых комбинаторных свойствах задачи о рюкзаке / Э.Н. Гордеев, В.К. Леонтьев // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2019. – Т. 59, № 8. – С. 1439–1447.

AUTOMATION OF THE FORMATION OF THE ASSORTMENT OF A RETAIL ENTERPRISE IN CONDITIONS OF STOCHASTIC DEMAND BASED ON THE HYBRID GO-PSO ALGORITHM

D.M. Bolshakov

Tver State Technical University, Tver, Russia

A binary hybrid algorithm combining a genetic algorithm and a particle swarm method is proposed to solve a stochastic multidimensional backpack problem in automating the formation of a retail company's product range in conditions of uncertain demand. The suitability of individuals is assessed by the Monte Carlo method with the generation of demand scenarios. Theoretically, it is shown that the computational complexity of one epoch of the algorithm linearly depends on the dimension of the problem and the total size of the populations, and the probability of deviation from the global opti-

mum decreases exponentially with increasing number of iterations. The estimates obtained confirm the high scalability and reliability of the proposed approach.

Keywords: *hybrid algorithm, genetic algorithm, particle swarm method, multidimensional backpack problem, stochastic demand, assortment automation, computational complexity*

УДК 658.5

ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ КАЛЕНДАРНО-СЕТЕВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ В ПРОВЕДЕНИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ НИОКР

В.В. Борисова

*Государственный университет управления,
г. Москва, Россия*

Статья посвящена вопросам применения методов сетевого планирования и управления в процессе проведения научно-исследовательских и опытно конструкторских работ (НИОКР), выполняемых в промышленных организациях. Научно-практический интерес представляет возможность комбинации сетевых моделей и методов для оперативного управления проблематикой НИОКР, решающая вопросы регулирования сроков выполнения проектов и распределения ресурсов в условиях высокой степени неопределённости внешней среды.

Ключевые слова: *научно-исследовательские и опытно конструкторские работы (НИОКР), календарно-сетевые методы планирования, сетевой граф, оптимизация сети по времени, метод критических цепочек (ССМ), буфер.*

Введение

Направленность российской экономики на поиск решений по импортозамещению большого объема различных промышленных продуктов (от элементарных деталей до станков) привела к повышенному вниманию самих промышленных предприятий и организаций к своей инновационной политике и, как следствие, к функционированию и развитию научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР), к их скорости и эффективности.

НИОКР является самой непредсказуемой сферой деятельности, обладающей высоким уровнем неопределенности, из-за чего её планирование крайне затруднено, а точное планирование почти невозможно. Тем не менее в арсенале данной сферы имеется немало алгоритмов и методов, позволяющих с разной степенью успеха решать выше обозначенную задачу.

Большим успехом для НИОКР стали календарно-сетевые методы, появившиеся в 50-х годах XX века с целью повысить точность планирования и ускорить координацию и контроль работ, входящих в производственно-технологическую цепочку. Однако современная промышленная среда с её высоким уровнем цифровизации, сложностью логистических путей

поставок, необходимостью учета давления санкционной политики Запада, потребностью реинжиниринга и реверс-инжиниринга поставила перед разработчиками новых изделий весьма жесткие требования: в максимально короткие сроки обеспечить производства и потребителей требуемыми промышленными товарами не уступающими зарубежным аналогам, но в какой-то степени и превосходящими их по качеству и конкурентоспособности.

Сетевые методы и модели должны были ответить на данные вызовы.

Материал и методы исследования

Содержательная часть понятий НИОКР реального сектора экономики регламентируется «ГОСТ 15.101-98 Система разработки и постановки продукции на производство (СРПП). Порядок выполнения научно-исследовательских работ» [1] и распадается на две части: научно-исследовательские работы (НИР) в виде «комплекса теоретических и (или) экспериментальных исследований, проводимых с целью получения обобщенных исходных данных, изыскания принципов и путей создания (модернизации) продукции» и опытно-конструкторские работы (ОКР) как «комплекс работ по разработке конструкторской и технологической документации на опытный образец, изготовлению и испытаниям опытного (головного) образца (опытной партии), выполняемых для создания (модернизации) продукции» [1].

Отраслевые стандарты (ОСТ 95 18-2001) так же разделяют общее определение НИОКР на НИР и ОКР [2], что соответствует практике проектировании наукоёмкой продукции промышленного сектора, разделяющего эти работы между научно-исследовательскими институтами, выполняющими НИР и конструкторскими бюро (отделами промышленных предприятий и организаций), ответственными за ОКР.

НИОКР для военной продукции регулируется «ГОСТ РВ 15.110 – 2003 Документация отчетная научно-техническая на научно-исследовательские работы, аванпроекты и опытно-конструкторские работы» [3] и «ГОСТ РФ 15.203-2001 «Система разработки и постановки продукции на производство. военная техника. Порядок выполнения опытно-конструкторских работ по созданию изделий и их составных частей» [4].

С точки зрения управления созданием новых образцов продукции/ изделий и товаров НИОКР промышленной сферы может быть представлен процессом производства наукоёмкой продукции (изделий, приборов, программных средств и прочее) и описан методологией бизнес-процессов APQC's Process Classification Framework (2020) в виде основного процесса «Разработка и управление товарами и услугами» (2), процесса верхнего уровня «Разработка товаров и услуг» (2.3) и подпроцессом «Моделирование и разработка прототипа товаров и услуг» (2.3.1). Так создание технического задания соответствует процессу нижнего уровня «Разработка проектных требований к товару/услуге» (2.3.1.3), а опытно-конструкторские работы выполняются в рамках процессов нижнего уровня «Создание прототипов/ экспериментальных вариантов» (2.3.1.9) [6].

Являясь неотъемлемой частью непрерывного цикла инновационного процесса [9], выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, определенных в ОСТ 95 18-2001, присутствует более чем в 50% его этапов [7]. Такое положение дел справедливо для всех типов промышленных организаций, с той лишь разницей, что для предприятий оборонной промышленности вопросы формирования предложений по созданию новых видов продукции проходят в штабах, а научным учреждениям или конструкторским бюро, выполняющим НИР и ОКР, формируется техническое задание или заказ на их создание.

Использование сетевых моделей и методов для НИОКР в сфере оборонной продукции регламентирует «ГОСТ РВ 15.208-2005 «Система разработки и постановки продукции на производство Военная техника. Единый сквозной план создания образца (системы, комплекса) и его (их) составных частей» [5], согласно которому оперативно-календарное планирование НИОКР обеспечивается методами сетевого планирования и управления (СПУ).

Построение и моделирование сетей выполняется на статистических и оптимизационных алгоритмах планирования, к которым относятся метод PERT, метод GERT, метод Монте-Карло и другие [10].

Результаты и обсуждение.

Наиболее затруднителен для практического воплощения этап оптимизации параметров сетевого графа.

Традиционным подходом в реализации данной задачи является оптимизация проекта по времени [8], в котором расчетные (временные) параметры сетевого графа проходят корректировку относительно директивно заданного срока выполнения комплекса работ по проекту путем сокращения длительности исполнения самих работ. При этом возможность выполнения корректировки определяется возможностью перевода длительности самих работ в так называемый напряженный режим, в котором уменьшенная до допустимого уровня величина длительности работ заменяет исходную. Данные уменьшенные величины устанавливаются в результате экспертного обсуждения и позволяют на основании эвристического алгоритма оптимизации сети по времени достичь заданного директивного срока.

Подобная идея заложена и в методе планирования и контроля выполнения расписания Д.Кроустана и У.Томпсона (модель D-CPM) с той лишь разницей, что в его основе лежит понятие мультиработы (работы-решения), использующей альтернативность вариантов выполнения проекта (применение различных режимов со своей длительностью и стоимостью как раз и обеспечивает подобную альтернативность). Однако при следовании ГОСТ РВ 15.208-2005 в НИОКР такая альтернативность невозможна.

Более разумным представляется возможность оптимизации сети на основе критических цепочек (ССМ) теории ограничений Голдрата. Идея данного подхода заключается в том, чтобы в критическую цепь сети ввести

так называемые буферы, позволяющие сделать цепь более устойчивой к внешнему и внутреннему воздействию, и минимизировать возможные риски самой цепи.

Четыре типа буферов (буфер проекта, буфер подачи, буфер ресурсов и буфер емкости) позволяют выполнить расшивку сети и свести сроки выполнения проекта к директивно заданным [11].

Буфер проекта направлен на защиту даты завершения проекта, которая может варьироваться в зависимости от изменений продолжительности действий в критической цепочке, и является основным буфером для проектов НИОКР, поскольку срыв сроков находится в зоне повышенной ответственности промышленных предприятий, особенно военно-промышленного комплекса. Обычно такой буфер ставится в самом конце цепочки, но для проектов по сложным конструкторским изделиям может быть установлен после устранения замечаний по предварительным испытаниям и перед непосредственно серией испытаний изделия, поскольку именно государственные испытания и присвоение литеры О1 являются для проекта конечной точкой, после чего контракт закрывается.

Буфер ресурсов и буфер емкости вводятся в критическую цепь для расшивки узкого места по ресурсам (критическим ресурсам) и бюджету для снижения рисков срыва сроков проекта при прохождении узких мест. Данные буферы позволяют избежать временных задержек по параллельно выполняемым направлениям работ, что достаточно часто наблюдается в конструкторских отделах.

Следует отметить, что целесообразность использования буферов объясняется и тем, что при реализации процесса НИОКР традиционно присутствует большая загруженность конструкторских отделов, препятствующая введению напряженного режима выполнения работ. Так же не всегда присутствует возможность передачи ряда работ другим предприятиям, особенно в части специальных оборонных товаров с соблюдением режима секретности. Изготовление может быть передано на аутсорсинг партнёрам, однако экономически это то же может быть неоправданно, особенно в случаях, когда цена изготовления одного продукта при единичном заказе намного выше цены при серийном заказе, и убытки от передачи могут превышать убытки от срыва сроков. Наибольшую угрозу также представляют собой работы, исполнителем которых частично или полностью являются сторонние организации. Длительность таких работ очень сложно прогнозировать, так как существуют сценарии заинтересованности сторонних организаций в срыве сроков проекта.

Выводы.

Управление процессом НИОКР, прежде всего, направлено на соблюдении установленных сроков выполнения проектов и выделенного объема финансового обеспечения. Использование сетевого моделирования вполне оправдано для решения таких задач. Обладая расширенным арсеналом методов и моделей сетевые подходы позволяют формировать процедуры

адаптации и контроля за критическими параметрами и, тем самым, планировать выполнение НИОКР. Однако, строгое соблюдение государственных и отраслевых стандартов при выполнении государственных заказов и формировании портфелей НИОКР для наукоемкой продукции промышленного сектора, накладывает ограничение на возможности применения традиционных календарно-сетевых алгоритмов, но позволяют находить оптимальные решения в их комбинировании с учетом требований изменяющейся внешней среды.

Список использованных источников

1. ГОСТ 15.101-98 Система разработки и постановки продукции на производство (СРПП). Порядок выполнения научно-исследовательских работ // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200003945?ysclid=m99ktfqvbr610189492> (дата обращения: 09.04.2025).
2. ГОСТ 95 18-2001 Порядок проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Основные положения // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200089913?ysclid=m9917kv62f652901355> (дата обращения: 02.04.2026).
3. ГОСТ РВ 15.110 – 2003 «Система разработки и постановки продукции на производство военная техника. Документация отчетная научно-техническая на научно-исследовательские работы, аванпроекты и опытно-конструкторские работы» // URL: <http://www.1bm.ru/techdocs/kgs/gost/909/info/28068/> (дата обращения: 01.04.2026).
4. ГОСТ РФ 15.203-2001 «Система разработки и постановки продукции на производство. военная техника. порядок выполнения опытно-конструкторских работ по созданию изделий и их составных частей» // URL.: <http://www.1bm.ru/techdocs/kgs/gost/910/info/27874/> (дата обращения: 01.04.2026).
5. ГОСТ РВ 15.208-2005 «Система разработки и постановки продукции на производство Военная техника. Единый сквозной план создания образца (системы, комплекса) и его (их) составных частей» URL.: <http://www.1bm.ru/techdocs/kgs/gost/910/info/28076/> (дата обращения: 01.04.2026).
6. Классификация бизнес-процессов компании. Методология APQC's Process Classification Framework (2020) URL.: <https://elma365.com/ru/apqc/> (дата обращения 02.04.2026).
7. Анюшин Д.С. Место НИОКР в общей структуре управления промышленной организации // Актуальные исследования, 2023. – № 9-2 (139). – С.61-63.
8. Васильева Л.Н., Деева, Е.А. Моделирование микроэкономических процессов и систем: учебник / Л.Н. Васильева, Е.А. Деева. – М.: КНОРУС, 2012. – 392 с.
9. Дармилова Ж.Д. Инновационный менеджмент / Дармилова Ж.Д. – М.: Дашков и К., 2018. – 168 с.
10. Царьков И.Н. Математические модели управления проектами / И.Н. Царьков. – М.: ИНФРА-М, 2018. – 514 с.
11. Critical Chain Project Management // Active Collab URL: <https://activecollab.com/blog/project-management/critical-chain-project-management-ccpm> (дата обращения: 04.04.2026).

ISSUES OF USING CALENDAR AND NETWORK PLANNING METHODS IN INDUSTRIAL R&D

V.V. Borisova

*State University of Management,
Russia, Moscow*

The article is devoted to the issues of application of network planning and management methods in the process of conducting research and development work (R&D) conducted in industrial organizations. Of scientific and practical interest is the possibility of combining network models and methods for operational management of R&D issues, solving the issues of regulating project deadlines and resource allocation in conditions of a high degree of uncertainty in the external environment.

Keywords: research and development (R&D), calendar-network planning methods, network graph, network optimization by time, critical chain management (CCM), buffer.

УДК 004.9:620.9

СОВРЕМЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ, МОНТАЖ И ДИАГНОСТИКА КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ 6–500 кВ

И.М. Валеев, А.Х. Сабитов

*Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия*

В работе рассматриваются силовые кабельные линии напряжением 6–500 кВ как критически важный элемент современных энергосистем в условиях урбанизации и плотной застройки. Прослеживается эволюция конструкций от трёхжильных бумажно-масляных кабелей к одножильным кабелям с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ/XLPE). Основной акцент сделан на анализе классификации по напряжению, конструкции токопроводящих жил, типам изоляции, экранам и защитным покровам. Исследуются особенности прокладки (в земле, тоннелях, на эстакадах), методы монтажа кабелей высокого напряжения, а также диагностика и ремонт с акцентом на частичные разряды и температурный мониторинг. Опираясь на анализ нормативной документации, предложены рекомендации по выбору кабелей, способов прокладки и систем эксплуатации.

Ключевые слова: кабельные линии, сшитый полиэтилен, бумажно-масляная изоляция, классы напряжения 6–500 кВ, прокладка кабелей, диагностика, частичные разряды.

Кабельные линии электропередачи (КЛ) 6–500 кВ являются безальтернативным решением при передаче электроэнергии в условиях плотной городской застройки, промышленных зон и на территориях с экологическими ограничениями. Диапазон напряжений охватывает все уровни энергосистемы: от распределительных сетей до магистральных связей между регионами.

На современном этапе развития КЛ наблюдается внедрение ряда передовых конструктивных и эксплуатационных решений.

Прежде всего, речь идёт о смене основного типа изоляции. Бумажно-масляная изоляция (МНН, МВД), имеющая ограничения по перепаду высот (30-50 м) и высокую пожарную опасность, активно вытесняется изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ). Кабели XLPE обладают низкими диэлектрическими потерями ($\text{tg}\delta$ 0,0005-0,001), длительной рабочей температурой до 90°C и отсутствием ограничений по перепаду высот.

Кроме того, конструкция кабелей дифференцируется по классу напряжения. Для 6-35 кВ доминируют трёхжильные кабели (секторные жилы, общая оболочка). Для 110-500 кВ стандартом является одножильное исполнение с медными проволочными экранами и, при необходимости, системами продольного охлаждения (водяными или масляными каналами).

Ещё одним важным направлением выступают методы диагностики. Для кабелей со СПЭ профилактические испытания повышенным напряжением не рекомендуются, поэтому ключевыми становятся:

- измерение частичных разрядов (ЧР) с локализацией дефектов до 1-5 м;
- распределённый температурный мониторинг (DTS);
- импульсная рефлектометрия и мостовые методы для точного определения места повреждения.

Наряду с преимуществами, эксплуатация КЛ 110-500 кВ порождает серьёзные вызовы.

В первую очередь это касается монтажа. Вес кабеля достигает 40-60 кг/м, минимальный радиус изгиба – до 25 наружных диаметров, а требуемое тяговое усилие жёстко ограничено (не более 50-70 Н/мм²). Монтаж соединительных муфт выполняется только в стерильных палатках с контролем влажности.

Следующий вызов связан с повреждениями. До 70% аварий приходится на муфты. Для бумажно-масляной изоляции характерны утечки масла и гигроскопичность, для СПЭ – развитие «водных три» (микротрещин при сочетанном действии поля и влаги).

Не менее остро стоит проблема ремонта. На кабелях 330-500 кВ ремонт одной муфты может занимать 3-7 суток, выполняться только специализированными подрядными организациями и стоить 3-10 млн руб.

В Российской Федерации эксплуатация КЛ регламентируется ПУЭ, ГОСТ Р 55025-2022 и СТО 56947007-29.060.20.071-2020. К числу перспективных направлений относятся:

переход от реактивного ремонта к предиктивной диагностике на основе ЧР и температурного профиля;

применение систем непрерывного мониторинга для ответственных линий 110-500 кВ;

использование кабелей XLPE для глубоких вводов в мегаполисах и пересечения уникальных препятствий (проливы, горы).

Для наглядного обобщения ниже представлена сводная таблица.

**Таблица 1 – Основные конструктивные особенности,
способы прокладки и методы диагностики КЛ 6-500 кВ**

Категория	Содержание	Ожидаемые эффекты / риски
Конструкция	-6-35 кВ: трёхжильные, секторные жилы, СПЭ или бумажно-масляная изоляция -110-500 кВ: одножильные, медные экраны, гофрированная алюминиевая оболочка	Снижение потерь, увеличение пропускной способности (90°C вместо 65–70°C), пожаробезопасность
Изоляция	-Бумажно-масляная ($\text{tg}\delta$ до 0,008) -Сшитый полиэтилен ($\text{tg}\delta$ до 0,001) - Газовая (элегаз) -нишевое применение	Устранение ограничений по перепаду высот, негигроскопичность, ресурс 35-40 лет и более
Прокладка	- В земле (6-35 кВ) – В тоннелях/коллекторах (110-500 кВ) – На эстакадах и мостах	Лучшее охлаждение в земле, защита в тоннелях, проблема отвода тепла в замкнутых объёмах
Монтаж	- Механизированная протяжка с контролем усилия – Радиус изгиба: 10-15 Dн (6-35 кВ) – 20-25 Dн (330-500 кВ)	Риск повреждения изоляции при нарушении радиуса. Для 110-500 кВ – монтаж в палатках
Диагностика	- Частичные разряды (чувствительность в пКл) – Рефлектометрия (0,5-2%) – Термомониторинг DTS($\pm 1^\circ\text{C}$)	Выявление дефектов на ранней стадии, неразрушающий контроль для СПЭ
Ремонт	- 6-35 кВ: 8-24 ч, силами служб – 110-220 кВ: 24-72 ч, спецбригады – 330-500 кВ: 3-7 сут, стоимость до 10 млн руб.	Переход от аварийного к планово-предиктивному ремонту

Цифровая трансформация эксплуатации кабельных линий представляет собой комплексный процесс, требующий внедрения систем непрерывного мониторинга частичных разрядов, температурного контроля и рефлектометрии. Ключевым условием успеха выступает способность сформировать сбалансированную систему, в которой сочетаются современные материалы (СПЭ), адаптированные технологии прокладки и цифровая диагностика. Для России переход от бумажно-масляных кабелей к СПЭ, а от реактивного обслуживания – к предиктивной аналитике является важнейшим фактором повышения надёжности городского электроснабжения и снижения аварийности на кабельных линиях 110-500 кВ.

Список использованных источников

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд. – М.: НЦ ЭНАС, 2020. – 512 с.
2. ГОСТ Р 55025-2022. Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение от 6 до 35 кВ. – М.: Стандартинформ, 2022.
3. СТО 56947007-29.060.20.071-2020. Кабельные линии напряжением 110-500 кВ. Организация эксплуатации. – М.: ПАО «ФСК ЕЭС», 2020.
4. Голубев, А.Н. Кабельные линии электропередачи. Конструкция, монтаж, эксплуатация / А.Н. Голубев, С. В. Серебрянников. – М.: Издательский дом МЭИ, 2021. – 408 с.
5. Дмитриев, М.В. Диагностика кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена / М.В. Дмитриев, В.А. Лавров. – СПб.: Центр технической экспертизы, 2022. – 296 с.

MODERN CONSTRUCTIONS, INSTALLATION AND DIAGNOSTICS OF 6-500 kV CABLE LINES

I.M. Valeev, A.Kh. Sabitov

*Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia*

This paper discusses 6-500 kV power cable lines as a critical element of modern power systems in urbanized and densely built areas. The evolution of designs from three-core paper-and-oil cables to single-core cables with cross-linked polyethylene (XLPE) insulation is traced. The main focus is on analyzing the classification by voltage, the design of the conductive wires, the types of insulation, the shields, and the protective covers. The features of installation (in the ground, in tunnels, and on overpasses), the methods of installing high-voltage cables, as well as diagnostics and repairs with a focus on partial discharges and temperature monitoring, are investigated. Based on the analysis of regulatory documentation, recommendations are proposed for the selection of cables, methods of laying and operation systems.

Keywords: cable lines, cross-linked polyethylene, paper-and-oil insulation, voltage classes 6-500 kV, cable laying, diagnostics, partial discharges.

УДК 004.9:620.9

ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОБСТВЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ ДЛЯ МАЛОГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА ПРИМЕРЕ ГАЗОПОРШНЕВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

И.М. Валеев, М.Ш. Гарифуллин

*Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия*

В данной работе рассматриваются экономические и технические аспекты внедрения газопоршневой электростанции для энергоснабжения малого промышленного предприятия. На примере предприятия с суммарной установленной мощностью 297,4 кВт (технологическое оборудование 280 кВт и освещение 17,4 кВт), расположенного в г. Мамадыш Республики Татарстан, проведён сравнительный анализ затрат на покупку электроэнергии из сети и на собственную генерацию. Оцениваются сроки окупаемости, влияние режима работы предприятия на экономическую эффективность, а также дополнительные преимущества когенерации.

Ключевые слова: газопоршневая электростанция, распределённая генерация, когенерация, энергоэффективность, окупаемость, малый бизнес.

Энергетический сектор является базовым элементом экономики. Для малых промышленных предприятий рост тарифов на электроэнергию и низкая надёжность распределительных сетей создают существенные экономические и технологические риски. В 2026 году тарифы на электроэнергию для бизнеса в Республике Татарстан достигли уровня 6,5–7,5

руб./кВт·ч, в то время как стоимость природного газа составляет 9,28 руб./м³. Указанное ценовое соотношение формирует предпосылки для перевода энергоснабжения малых предприятий на собственную генерацию на основе газопоршневых технологий.

В отличие от традиционных дизельных электростанций, газопоршневые установки (ГПУ) обладают более низкой себестоимостью выработки электроэнергии, повышенным ресурсом и возможностью утилизации тепла (когенерация). Вместе с тем их внедрение требует детального технико-экономического обоснования с учетом конкретного режима работы предприятия, стоимости оборудования и затрат на сервисное обслуживание.

В качестве объекта исследования выбрано малое промышленное предприятие, расположенное в г. Мамадыш (Республика Татарстан), со следующими параметрами:

Площадь производственного помещения: 900 м².

Мощность технологического оборудования: 100 кВт+80 кВт+100 кВт=280 кВт.

Мощность освещения: 29 ламп × 0,6 кВт = 17,4 кВт.

Суммарная установленная мощность: 297,4 кВт.

Режим работы: 2 смены по 12 часов (круглосуточно, 24 часа в сутки).

Годовой фонд рабочего времени: 365 × 24 = 8 760 часов.

Для сравнения приняты два варианта:

1. Сетевой вариант – покупка электроэнергии по коммерческому тарифу для юридических лиц (6,5 руб./кВт·ч).

2. Автономный вариант – собственная газопоршневая электростанция мощностью 300 кВт с утилизацией тепла.

Характеристики газопоршневой установки

Выбрана ГПУ мощностью 300 кВт Tedom Cento T300SP :

Электрическая мощность: 302 кВт.

Тепловая мощность (когенерация): 422 кВт.

Расход природного газа при 100% нагрузке: 91 м³/час.

Электрический КПД: 35,1%.

Общий КПД (с утилизацией тепла): 87,7%.

Ресурс до капитального ремонта: 60 000 моточасов (около 6–7 лет непрерывной работы).

Напряжение на выходе: 400 В (прямое подключение к оборудованию).

Ориентировочная стоимость оборудования с монтажом: 16–20 млн руб.

Сравнительный расчёт затрат на электроэнергию

При работе от сети

За 1 час: 297,4 кВт × 6,5 руб. = 1 933,1 руб./час.

За 1 год: 1 933,1 руб./час × 8 760 ч = 16 934 000 руб./год

При работе от ГПУ (только газ)

· Расход газа: 87,7 м³/час × 9,28 руб./м³ = 813,8 руб./час.

· Затраты на газ за год: 813,8 руб./час × 8 760 ч = 7 129 378 руб./год.

Затраты на техническое обслуживание ГПУ

Усреднённые затраты на масло, свечи, регламентные работы: 0,5 руб./кВт·ч.

Годовые затраты на сервис: $297,4 \text{ кВт} \times 8\,760 \text{ ч} \times 0,5 \text{ руб.} = 1\,302\,612 \text{ руб./год.}$

Полные затраты при работе от ГПУ

$7\,129\,378 \text{ руб. (газ)} + 1\,302\,612 \text{ руб. (сервис)} = 8\,431\,990 \text{ руб./год.}$

Годовая экономия на электроэнергии

$16\,934\,000 \text{ руб.} - 8\,431\,990 \text{ руб.} = 8\,502\,010 \text{ руб./год.}$

Дополнительные эффекты от когенерации

Утилизация тепловой энергии, вырабатываемой ГПУ (425 кВт), позволяет заменить традиционное электрическое или газовое отопление производственного цеха площадью 900 м². В климатических условиях г. Мамадыш отопительный сезон составляет примерно 210 дней.

Годовая выработка тепла: $422 \text{ кВт} \times 24 \text{ ч} \times 210 \text{ дней} = 2\,126\,880 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ тепловой энергии.

При замещении газового котельного оборудования экономия может составить дополнительно 600 000 – 900 000 руб./год.

Срок окупаемости

Суммарный годовой экономический эффект (с учётом когенерации) принимаем равным 9,55 млн руб./год.

Стоимость ГПУ «под ключ»: 16–20 млн руб.

Срок окупаемости = $(16 \dots 20 \text{ млн руб.}) / 9,55 \text{ млн руб./год} \approx 1,7 - 2,1 \text{ года}$

При наличии государственных мер поддержки (субсидирование до 60% затрат для объектов агропромышленного комплекса) окупаемость может сократиться до 1 года.

Для малого предприятия в г. Мамадыш с суммарной мощностью 297,4 кВт и круглосуточным режимом работы внедрение газопоршневой электростанции мощностью 300 кВт является экономически целесообразным. Ключевые выводы:

1. Годовая экономия на электроэнергии по сравнению с сетевым тарифом превышает 8,8 млн рублей.

2. Срок окупаемости капитальных вложений составляет около 2 лет, что приемлемо для малого бизнеса.

3. Утилизация тепла ГПУ обеспечивает дополнительную экономию на отоплении производственных помещений и повышает общий КПД до 90%.

4. Собственная генерация существенно снижает риски, связанные с аварийными отключениями и дальнейшим ростом сетевых тарифов.

5. При высоком коэффициенте использования оборудования (24/7) газопоршневая технология превосходит дизельную по экономичности и ресурсу.

Список использованных источников

1. Государственный комитет Республики Татарстан по тарифам. Об установлении тарифов на электрическую энергию для потребителей Республики Татарстан на 2026 год: Приказ № 34/2026-Э от 15.12.2025. – Казань, 2025. – 27 с.

2. Государственный комитет Республики Татарстан по тарифам. Об установлении розничных цен на природный газ, реализуемый населению и юридическим лицам на территории Республики Татарстан, на 2026 год: Приказ № 12/2026-Г от 20.10.2025. – Казань, 2025. – 15 с.

3. Зарипов И.Р., Хайруллин И.А. Техничко-экономическое обоснование применения газопоршневых установок для малых промышленных предприятий // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2025. – № 4. – С. 42–51.

4. Сафиуллин Р.Н., Галимов Р.Р. Анализ эффективности когенерационных установок в условиях Республики Татарстан // Известия КГЭУ. – 2024. – № 3(63). – С. 78–87.

5. Воронин С.М., Кузнецов А.В. Сравнительная оценка себестоимости электроэнергии при сетевом и автономном энергоснабжении малого бизнеса // Промышленная энергетика. – 2026. – № 2. – С. 23–31.

6. Постановление Правительства РФ от 15.04.2024 № 478 (ред. от 10.12.2025) «О мерах государственной поддержки проектов в области распределённой генерации и когенерации для субъектов малого и среднего предпринимательства». – М., 2025. – 12 с.

7. Тарифы на электроэнергию как стимулирующий фактор развития распределенной генерации в России <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49045999>

THE FEASIBILITY OF USING ON-SITE POWER GENERATION FOR A SMALL ENTERPRISE: A CASE STUDY OF A GAS-PISTON POWER PLANT

I.M. Valeev, M.Ш. Гарифуллин

*Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia*

This paper examines the economic and technical aspects of implementing a gas-piston power plant for the energy supply of a small industrial enterprise. Using the example of an enterprise with a total installed capacity of 297.4 kW (process equipment: 280 kW and lighting: 17.4 kW), located in Mamadysh, Republic of Tatarstan, a comparative analysis is conducted of the costs of purchasing electricity from the grid versus on-site power generation. The study evaluates payback periods, the impact of the enterprise's operating mode on economic efficiency, and the additional benefits of cogeneration.

Keywords: *gas-piston power plant, distributed generation, cogeneration, energy efficiency, payback period, small business.*

УДК 004

СТАНДАРТИЗАЦИЯ РАЗРАБОТКИ И ТРЕБОВАНИЙ ПРОГРАММНЫХ СИСТЕМ

О.А. Варыгина

*Российский университет дружбы народов,
г. Москва, Россия*

Рассматриваются вопросы стандартизации разработки и требований программных систем, а также их значение в современном процессе создания программного обеспечения.

Ключевые слова: программное обеспечение, стандартизация, документирование, спецификация, управление, требования.

Информационные технологии активно применяются в промышленности, медицине, образовании, банковской сфере и, в принципе, в повседневной жизни. По этой причине программное обеспечение стало основой функционирования большинства технических и организационных процессов, от качества которого напрямую зависит эффективность работы предприятий и стабильность информационной инфраструктуры.

Разработка программных систем представляет собой сложный процесс, основанный на анализе предметной области, проектировании архитектуры, программной реализации, тестирования и сопровождения, где одним из важнейших этапов разработки является определение требований к программному продукту.

Требования описывают функциональные возможности системы, ограничения её использования, характеристики производительности, безопасности и взаимодействия с пользователями. Именно они определяют основу будущего программного продукта и оказывают влияние на все последующие этапы разработки, а ошибки, допущенные при формировании равно увеличению стоимости проекта, нарушению сроков разработки, появлению дефектов и несоответствию программного продукта ожиданиям заказчика.

Итогом, требования оказывают непосредственное влияние на все этапы жизненного цикла программного обеспечения. На этапе анализа требования используются для определения целей проекта и выявления потребностей заказчика, а в процессе проектирования они служат основой для построения архитектуры системы и выбора технических решений. Во время реализации требования определяют логику работы программных компонентов, а на этапе тестирования используются для проверки соответствия системы установленным критериям.

Особую важность требования приобретают в крупных проектах, где в разработке участвуют десятки специалистов различных направлений. В таких условиях требования становятся основным средством коммуникации между аналитиками, разработчиками, тестировщиками, менеджерами и заказчиками. Поэтому развитие программной инженерии привело к необходимости создания единых стандартов документирования требований.

Стандартизация обеспечивает унификацию процессов разработки программных систем и позволяет снизить количество ошибок, связанных с неоднозначной интерпретацией требований.

Основными задачами стандартизации являются:

- обеспечение качества программного обеспечения;
- снижение рисков разработки;
- повышение совместимости программных компонентов;
- унификация процессов проектирования;
- обеспечение безопасности и надежности систем;

– упрощение сопровождения и модернизации программных продуктов.

Стандарты формируют единый понятийный аппарат и позволяют различным участникам разработки взаимодействовать в рамках общепринятых правил. Это особенно важно при реализации крупных распределённых проектов, в которых участвуют десятки или сотни специалистов.

Стандарты документирования требований представляют собой совокупность правил и рекомендаций, определяющих методы сбора, анализа, описания и управления требованиями на различных этапах жизненного цикла программного обеспечения.

К примеру, одним из наиболее известных международных стандартов является стандарт ISO/IEC/IEEE 29148, который представляет собой фундаментальное руководство по инженерии требований, которое детально регламентирует процессы извлечения, анализа, документирования, трассировки и верификации условий создания сложных ИТ-систем на всех этапах их жизненного цикла.

Также стандарт ISO/IEC 12207 определяет процессы жизненного цикла программного обеспечения. Он охватывает все стадии разработки:

- анализ требований;
- проектирование;
- реализацию;
- тестирование;
- внедрение;
- сопровождение;
- вывод из эксплуатации.

Главным преимуществом данного стандарта является системный подход к организации разработки программного обеспечения. Использование ISO/IEC 12207 позволяет снизить вероятность ошибок, связанных с неструктурированным управлением проектом.

Но важно, что центральным элементом инженерии требований является спецификация требований к программному обеспечению. Спецификация представляет собой структурированный документ, содержащий описание всех требований к программной системе.

Основная задача спецификации заключается в формировании единого источника информации о программном продукте. Она используется аналитиками, разработчиками, тестировщиками, менеджерами проекта и заказчиками на протяжении всего жизненного цикла системы.

Спецификация требований обладает высокой практической и юридической значимостью. Во многих проектах данный документ включается в состав договорной документации между заказчиком и разработчиком, определяя обязанности сторон и критерии оценки готового продукта. Кроме того, спецификация используется как основа для проектирования архитектуры системы, реализации программных компонентов и разработки тестовой документации. После завершения проекта спецификация помогает сопровождать и модернизировать программный продукт. И даже в условиях

гибких методологий разработки, где объём документации может быть сокращён, требования продолжают играть ключевую роль в организации процесса разработки.

И получается, что стандартизация разработки и документирования требований программных систем является важнейшим условием успешной реализации современных ИТ-проектов, так как требования определяют функциональность программного продукта, оказывают влияние на все этапы его жизненного цикла и служат основой взаимодействия между участниками проекта.

Список использованных источников

1. Липаева В.В. Документирование сложных программных средств / В.В. Липаева. – М.: СИНТЕГ, 2005. – 216 с.

STANDARDIZATION OF SOFTWARE SYSTEM DEVELOPMENT AND REQUIREMENTS

O.A. Varygina

*Peoples' Friendship University of Russia,
Moscow, Russia*

The issues of standardization of development and documentation of requirements of software systems, as well as their importance in the modern process of software creation are considered.

Keywords: software, standardization, documentation, specification, management, requirements.

УДК 61

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СТАНДАРТИЗАЦИИ В СИСТЕМЕ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ

О.А. Варыгина

*Российский университет дружбы народов,
г. Москва, Россия*

Рассматриваются основные направления стандартизации в системе здравоохранения и медицинской информатики. Анализируются вопросы унификации медицинской терминологии, электронного документооборота, обмена медицинскими данными, стандартизации медицинских изображений и информации.

Ключевые слова: здравоохранение, стандартизация, медицинские информационные системы, электронная медицинская карта, медицинский документооборот.

Здравоохранение относится к числу наиболее сложных и информационно насыщенных сфер деятельности. Ежедневно в медицинских органи-

зациях создаются и обрабатываются огромные объёмы информации: истории болезни пациентов, результаты лабораторных исследований, диагностические изображения, сведения о назначенных лекарственных препаратах и данные о проведённом лечении, поэтому без единых стандартов работа с такими данными становится затруднительной, а взаимодействие между различными медицинскими системами – неэффективным. В этом контексте, стандартизация представляет собой процесс разработки и внедрения единых норм, правил и требований, регулирующих создание, обработку и обмен медицинской информацией. Без единых стандартов невозможно эффективное взаимодействие между лечебными учреждениями, лабораториями, страховыми организациями и государственными органами управления здравоохранением.

Основными задачами стандартизации являются:

- обеспечение совместимости медицинских информационных систем;
- унификация медицинской документации;
- повышение качества и достоверности медицинских данных;
- обеспечение безопасности информации;
- создание единого информационного пространства здравоохранения;
- поддержка международного обмена медицинской информацией.

Получается, её главная цель заключается в создании единого информационного пространства, обеспечивающего доступность, точность и безопасность медицинских данных.

Одним из важнейших направлений стандартизации является унификация медицинской терминологии и классификаций. В медицинской практике используется большое количество терминов, обозначений и диагностических формулировок, которые могут различаться в зависимости от медицинской школы, страны или конкретного лечебного учреждения. Для решения этой проблемы были созданы международные системы классификации заболеваний, при использовании которых врачам, исследователям и органам управления здравоохранением проще одинаково интерпретировать медицинскую информацию независимо от страны и языка. Это имеет большое значение для статистического учёта, проведения научных исследований и анализа эпидемиологических данных.

Наряду с классификацией заболеваний большое значение имеет стандартизация электронного медицинского документооборота. В течение длительного времени основным способом хранения медицинской информации оставалась бумажная документация. Однако с ростом количества пациентов и увеличением объёма медицинских данных бумажные архивы стали менее эффективными. Для решения этих проблем были разработаны медицинские информационные системы, предназначенные для автоматизации хранения и обработки медицинской информации. Такие электронные медицинские карты позволяют хранить сведения о пациенте в цифровом формате, включая результаты обследований, диагно-

зы, назначения врача, данные лабораторных исследований и историю лечения. Использование электронных систем значительно ускоряет доступ к информации и улучшает взаимодействие между медицинскими специалистами. Но автоматизация затронула не только клинические подразделения, но и административные, хозяйственные и вспомогательные службы медицинских учреждений. Современные информационные системы обеспечивают автоматизированный учёт пациентов, управление лекарственными препаратами, организацию внутреннего документооборота и контроль финансовых процессов.

Несмотря на активное внедрение медицинских информационных систем, одной из основных проблем остаётся организация обмена данными между различными учреждениями здравоохранения. Во многих случаях используются информационные системы, разработанные разными производителями и основанные на собственных форматах хранения информации. Как правило, такие системы внедряются поэтапно в зависимости от потребностей отдельных подразделений. В результате формируется разрозненная информационная среда, в которой обмен данными между системами становится затруднительным. Отсутствие совместимости приводит к необходимости повторного ввода информации, дублированию документов и повышению вероятности ошибок. Особенно важной становится проблема передачи клинической информации между медицинскими учреждениями. Для её решения необходимы также разработаны международные стандарты обмена медицинскими данными.

В последние годы всё большую роль в здравоохранении начинают играть телемедицинские технологии и системы искусственного интеллекта. Телемедицина позволяет проводить дистанционные консультации, удалённый мониторинг пациентов и передачу диагностической информации на большие расстояния. Искусственный интеллект применяется для анализа медицинских изображений, диагностики заболеваний и поддержки принятия врачебных решений, однако, эффективная работа таких технологий невозможна без стандартизации медицинских данных и совместимости информационных систем.

Таким образом, стандартизация является фундаментальной основой развития современной системы здравоохранения, так как она обеспечивает совместимость медицинских информационных систем, упрощает обмен данными, повышает качество медицинской помощи и способствует безопасности пациентов, а основные направления стандартизации включают унификацию медицинской терминологии, электронного документооборота, медицинских изображений, информации о лекарственных препаратах и защиту медицинских данных.

Список использованных источников

1. Воробьев П.А. [и др.]. Стандартизация в здравоохранении на современном этапе // Пробл. станд. в здравоохр. – 2007. – № 5. – С. 3-9.

THE MAIN DIRECTIONS OF STANDARDIZATION IN THE HEALTHCARE SYSTEM

O.A. Varygina

*Peoples' Friendship University of Russia,
Moscow, Russia*

The main directions of standardization in the healthcare system and medical informatics are considered. The issues of unification of medical terminology, electronic document management, exchange of medical data, standardization of medical images and information are analyzed.

Keywords: healthcare, standardization, medical information systems, electronic medical record, medical document management.

УДК 621.313.333.2.045.001.24

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ ПУТЁМ ОПТИМИЗАЦИИ ФОРМЫ ПАЗОВ

Д.А. Волосюк, Д.В. Шутова¹

*Санкт-Петербургский университет гражданской авиации и
м. главного маршала авиации А.А. Новикова,
г. Санкт-Петербург, Россия*

В статье рассматривается метод повышения энергоэффективности асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором за счёт оптимизации геометрии пазов статора и ротора. Показано, что традиционные формы пазов создают неравномерность магнитного поля, генерируют высшие гармоники и увеличивают добавочные потери. Предложен подход к изменению конфигурации пазов, основанный на снижении зубцовых пульсаций и вытеснения тока.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, короткозамкнутый ротор, энергоэффективность, форма пазов, гармонические потери.

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором остаются основным типом электродвигателей в промышленности, сельском хозяйстве, транспортной и бытовой технике. Их доля в общем парке электромашин превышает семьдесят процентов, а доля в потреблении электроэнергии, преобразуемой в механическую работу, ещё выше. В условиях глобального перехода к энергоэффективным технологиям и ужесточения требований международных стандартов (классы IE3, IE4 по IEC 60034-30) задача повышения КПД асинхронных двигателей становится критически важной. Традиционные способы увеличения коэффициента полезного действия, такие как наращивание массы активных материалов, замена стали на более

¹ Научный руководитель: Д.И. Сагитов.

дорогие марки с низкими удельными потерями или увеличение длины пакета ротора и статора, ведут к значительному удорожанию конечного изделия. Поэтому всё большее внимание исследователей и разработчиков привлекает альтернативный путь – геометрическая оптимизация магнитной системы, в частности, изменение формы пазов статора и ротора. Этот метод не требует дополнительных материальных затрат, но даёт ощутимый прирост энергоэффективности за счёт более рационального распределения магнитного потока и снижения паразитных гармонических составляющих [1].

Чтобы понять, почему форма паза так сильно влияет на потери, необходимо обратиться к физике работы асинхронной машины. Магнитное поле в воздушном зазоре создаётся совместным действием обмотки статора и наведённых токов в роторе. В идеальном случае кривая распределения индукции вдоль окружности зазора должна быть синусоидальной. Однако реальные двигатели имеют зубчатую структуру как с одной, так и с другой стороны зазора. Пазы, в которых размещены проводники обмотки статора и стержни короткозамкнутой обмотки ротора, представляют собой области с очень низкой магнитной проницаемостью (фактически – воздушные полости). Поэтому при переходе через паз магнитный поток резко снижается, а при переходе через зубец – возрастает. Возникают зубцовые пульсации индукции, порождающие целый спектр высших пространственных гармоник поля. Эти гармоники вращаются с разными скоростями, не совпадающими со скоростью ротора, и наводят в стержнях короткозамкнутой обмотки токи повышенной частоты. Возникают дополнительные потери: в стали – из-за вихревых токов и гистерезиса на частотах пульсаций, а в обмотке ротора – из-за поверхностного эффекта и эффекта вытеснения тока в верхнюю часть стержня. Именно эти добавочные потери при нагрузке могут достигать двух процентов от входной мощности [2].

Оптимизация формы пазов направлена на смягчение этих нежелательных эффектов. Основная идея заключается в том, чтобы сделать изменение магнитной проводимости вдоль окружности зазора более плавным. В классических двигателях часто применяются открытые или полуоткрытые пазы статора с трапецеидальным сечением и острыми углами. Такая геометрия создаёт резкие перепады магнитного сопротивления, что максимизирует амплитуду зубцовых гармоник. Если же скруглить углы паза, сузить шлиц (щель, выходящую в зазор) и придать пазу грушевидную или каплевидную форму, то картина поля становится более гладкой. Ещё более эффективным оказывается изменение формы пазов ротора. Традиционные круглые или прямоугольные пазы ротора создают концентрацию магнитного потока в перемычках между пазами и способствуют сильному вытеснению тока в рабочем режиме. Оптимальной с точки зрения энергоэффективности считается трапецеидальная форма паза ротора, сужающаяся ко дну, с плавными радиусами во всех углах. Такая конфигурация, во-первых, выравнивает индукцию в зубцах ротора, устраняя локальное насыщение, а во-вторых, снижает глубину проникновения тока в стержень на рабочей частоте, уменьшая эффективное сопротивление обмотки ротора [3].

Особого внимания заслуживают комбинированные и асимметричные формы пазов. Например, пазы ротора с небольшой асимметрией относительно радиальной оси позволяют демпфировать некоторые высшие гармоники за счёт интерференции полей от соседних стержней. Ещё один перспективный тип – это пазы с двойной клеткой, но оптимизированные не для пускового режима, как это делается в классических двигателях с повышенным пусковым моментом, а для рабочего режима. В такой конструкции верхняя часть паза выполняется узкой и высокой, что увеличивает активное сопротивление на высоких частотах (для гармоник), а нижняя часть – широкой, чтобы снизить сопротивление на основной частоте. Правильный подбор соотношения размеров позволяет почти вдвое снизить добавочные потери от высших гармоник без ухудшения номинального скольжения [4].

Для практического достижения максимальной энергоэффективности требуется не эмпирический подбор формы, а численное моделирование, обычно методом конечных элементов. Программные пакеты, такие как Ansys Maxwell, JMAG или COMSOL Multiphysics, позволяют построить параметрическую модель двигателя, задать геометрию пазов с несколькими варьируемыми размерами (ширина и высота шлица, радиус дна, угол наклона стенок), провести расчёт магнитного поля и вычислить суммарные потери. Современные оптимизаторы, встроенные в эти пакеты (например, генетический алгоритм или оптимизация по поверхности отклика), автоматически перебирают тысячи вариантов, чтобы найти форму, дающую максимум КПД при соблюдении ограничений по пусковому моменту и нагреву. Моделирование показывает, что для типового двигателя мощностью 15–30 кВт оптимизированная форма паза позволяет снизить потери в стали на тридцать-сорок процентов, а добавочные потери – в два-три раза. В абсолютных цифрах прирост КПД составляет от двух до трёх с половиной процентных пунктов. Например, двигатель, имевший исходный КПД 89,2%, после оптимизации пазов может достичь 92,4% без увеличения массы меди и стали. Это соответствует переходу с класса IE2 на класс IE3 или даже IE4 при минимальных затратах.

Конечно, у геометрической оптимизации есть и технологические ограничения. Слишком узкий шлиц паза статора затрудняет укладку обмотки, особенно в двигателях с ручной намоткой. Плавные скругления и сложные профили требуют более дорогой штамповой оснастки для листов сердечника. Однако при массовом производстве эти затраты окупаются в течение нескольких месяцев за счёт экономии электроэнергии за весь срок службы двигателя. Кроме того, современные технологии лазерной и гидроабразивной резки позволяют изготавливать пластины ротора и статора со сложными формами без существенного удорожания в мелкосерийном производстве. Поэтому метод оптимизации формы пазов сегодня признаётся одним из наиболее экономически эффективных способов повышения энергоэффективности асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Он может применяться как при создании но-

вых двигателей классов IE3 и IE4, так и при модернизации существующих серий, где достаточно перепроектировать штампы для листов сердечника, сохранив все остальные технологические операции неизменными. В совокупности с современными методами управления и высококачественными подшипниками оптимизация пазов позволяет приблизить асинхронный двигатель по энергоэффективности к более дорогим синхронным машинам с постоянными магнитами, сохранив его ключевые преимущества – надёжность, простоту конструкции и низкую стоимость обслуживания [5].

Таким образом, предлагаемый подход является не только научно обоснованным, но и практически востребованным в современном электромашиностроении.

Список использованных источников

1. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины, ч. 2: Машины переменного тока. Учебник для студентов вузов. – Л.: Энергия, 2023. – 648 с.
2. Способ повышения энергоэффективности асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. – [Электронный ресурс], – URL: <https://www.dissercat.com/content/sposob-povysheniya-energoeffektivnosti-asinkhronnykh-dvigateli-s-korotkozamknutym-rotorom> (дата обращения 12.05.2026).
3. Повышение удельных характеристик асинхронных двигателей. – [Электронный ресурс], – URL: <file:///C:/Users/dchekmareva/Downloads/vasilyevana,+5.pdf> (дата обращения 12.05.2026).
4. Копылов И.П. Электрические машины: учебник для вузов. – М.: Логос, 2000. – 607 с.
5. Повышение энергоэффективности асинхронных двигателей. – [Электронный ресурс], – URL: <https://elib.osu.ru/bitstream/123456789/1553/1/351-354.pdf> (дата обращения 12.05.2026).

IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF ASYNCHRONOUS MOTORS WITH A CLOSED ROTOR BY OPTIMIZING THE SHAPE OF THE GROOVES

D.A. Volosyuk, D.V. Shutova¹

*St. Petersburg University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A. A. Novikov,
St. Petersburg, Russia*

The article discusses a method for improving the energy efficiency of asynchronous motors with a closed rotor by optimizing the geometry of the stator and rotor slots. It is shown that the traditional groove shapes create an uneven magnetic field, generate higher harmonics and increase additional losses. An approach to changing the groove configuration based on reducing tooth pulsations and current displacement is proposed.

Keywords: *asynchronous motor, closed-loop rotor, energy efficiency, groove shape, harmonic losses.*

¹ Scientific supervisor: D.I. Sagitov.

СИНТЕЗ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ И РУЧНЫХ МЕТОДОВ В СОВРЕМЕННОЙ ХУДОЖЕСТВЕННОЙ ОБРАБОТКЕ КАМНЯ: ОТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ К ЭСТЕТИЧЕСКОЙ ВЫРАЗИТЕЛЬНОСТИ

Н.А. Выдрина¹

*Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова,
г. Архангельск, Россия*

В статье рассматривается проблемное поле взаимодействия ручных и машинных технологий в художественной камнеобработке. В отличие от работ, акцентирующих противопоставление «ремесло против индустрии», здесь обосновывается концепция синтетического подхода, при котором фрезерование с ЧПУ, гидроабразивная резка и лазерная гравировка выступают не как альтернатива ручному труду, а как средство предварительного формообразования, оставляющее за мастером финишную художественную доработку.

Ключевые слова: *художественная резьба по камню, гибридные технологии, авторское изделие, цифровая реконструкция орнамента, финишная доработка, идентичность ремесла.*

Технологическая модернизация камнеобрабатывающей отрасли, несмотря на очевидные экономические преимущества, породила дискуссию о судьбе традиционного художественного ремесла. В профессиональном сообществе скульпторов и резчиков по камню устойчиво существует опасение, что автоматизация приведёт к унификации художественного языка и исчезновению индивидуального почерка мастера. Действительно, станок с ЧПУ воспроизводит любой заданный трёхмерный образ с абсолютной идентичностью в каждой копии, что составляет его сильную сторону для тиражного производства, но одновременно является слабой стороной для продукции, претендующей на статус уникального артефакта.

Однако, как показывают наблюдения последних лет, вектор развития отрасли направлен не на вытеснение ручного труда, а на перераспределение функций между человеком и машиной. Грубое формообразование, раскрой и выборка больших объёмов материала передаются автоматизированным системам, тогда как финишная обработка, проработка мелких деталей, придание поверхности особой фактуры остаются за резчиком. В зарубежной литературе подобный подход получил название «гибридного прототипирования». (hybridprototyping) или «ремесла с цифровой поддержкой».

1. Нередуцируемые качества ручной обработки.

Для понимания пределов автоматизации необходимо чётко определить, какие качества ручного труда не могут быть воспроизведены машинными методами даже при самом высоком уровне развития технологий. В

¹ Научный руководитель: У.С. Хамраев – ассистент кафедры автомобильных дорог и строительного производства ВИШ.

психологии труда и искусствоведении выделяют по меньшей мере три таких качества. Первое – это тактильная чувствительность в процессе обработки. Опытный резчик по камню распознаёт по вибрации и сопротивлению инструмента невидимые глазу неоднородности материала: зоны срастания кристаллов, микротрещины, участки с изменённой плотностью. На основе этой информации мастер корректирует траекторию удара, силу нажима и угол атаки инструмента. Современные станки с ЧПУ, оснащённые системами контроля усилия (адаптивная подача), могут измерять сопротивление резанию и корректировать режимы, однако они не способны интерпретировать эти данные в эстетических категориях: для станка важна целостность инструмента и отсутствие брака, но не художественная выразительность будущей поверхности.

Второе качество – способность к импровизации в процессе работы. В классической ручной резьбе художник не следует жёсткой траектории; он оставляет себе свободу усиливать или ослаблять рельеф, углублять тени, подчёркивать отдельные фрагменты уже в процессе создания. Некоторые из лучших произведений каменной пластики возникали именно как результат такой импровизации, когда мастер «следовал за камнем». Станок с ЧПУ принципиально лишён этой способности – он исполняет предзаданную программу и не может отступить от неё ни на миллиметр.

Третье качество – индивидуальный почерк мастера как совокупность устойчивых особенных приёмов, по которым специалист может идентифицировать автора. Вариативность удара резца, характер шлифовки, манера моделировки мелких элементов – всё это формирует неповторимый визуальный код. При машинном фрезеровании этот код полностью утрачивается, уступая место «нейтральному» машинному рельефу.

Именно сохранение этих трёх качеств оправдывает использование ручного труда даже в условиях доступности автоматизированных решений. Однако экономическая реальность такова, что полный цикл ручной обработки становится доступен лишь для элитарных заказов. Для широкого круга задач (интерьерные панно, мемориальные комплексы, декоративные элементы фасадов) требуется компромисс.

2. Феноменология гибридного формообразования.

Под гибридным формообразованием в камнеобработке понимается технологический процесс, в котором машинная и ручная обработка последовательно применяются к одной заготовке с распределением задач по принципу «грубая предварительная форма – станок, тонкая доработка – человек». Этот подход имеет несколько реализаций. Наиболее распространённой является схема «ЧПУ-фрезерование плюс ручная шлифовка». После снятия станком основного объёма на поверхности остаются следы фрезы – так называемый «микроверинг» (ступеньки между соседними проходами) с высотой микронеровностей до 0,3–0,5 мм. Эти неровности удаляются вручную абразивными камнями последовательной зернистости (от 60 до 1000 grit). Таким образом, станок делает «чёрновую» и «чистовую» выборку формы, а человек выполняет финишную фактурную обра-

ботку. В ряде случаев мастер намеренно сохраняет или акцентирует некоторые следы фрез – например, при имитации «рваного» камня.

Более сложная схема предполагает поэтапную гибридизацию: ЧПУ-фрезерование грубого рельефа → ручная проработка ключевых деталей → повторное ЧПУ-фрезерование для восстановления утраченной геометрии → ручная шлифовка. Такая схема применяется в производстве крупноформатных скульптурных композиций, когда необходимо соединить точность воспроизведения (например, лица портретируемого) с общей выработкой объёма. В исследовании, посвящённом цифровой реконструкции анатолийской каменной резьбы, авторы продемонстрировали, как параметрические модели исторических орнаментов могут быть интегрированы в трёхосевую обработку с последующей ручной коррекцией.

В мемориальной практике сложился устойчивый гибрид алмазной распиловки и лазерной гравировки. Памятник выпиливается из гранитного блока на многодисковом станке (форма грубого параллелепипеда), затем на нём алмазной фрезой выбираются плоскости для текста и портрета, после чего лазерным гравировальным станком наносится фотографическое изображение. Завершает процесс ручная полировка «слёз» (фигурных кромок), которые автоматическая обработка не может сделать столь же гладкими.

3. Методика финишной доработки: от протокола к искусству.

В ходе исследования нами была изучена методика работы мастерской «Камень-Арт» (г. Петрозаводск), специализирующейся на создании барельефных портретов на граните. Технологический процесс строится следующим образом. На первом этапе выполняется трёхмерное сканирование гипсового оригинала (если он существует) или моделирование в ZBrush. Полученная полигональная сетка преобразуется в управляющую программу для пятиосевого фрезерного центра CMS Brembana. Станок в течение 4–6 часов выбирает основной объём с шагом фрезы 1,5 мм. На втором этапе мастер (художник-монументалист с опытом не менее 10 лет) в течение 8–12 часов вручную дорабатывает поверхность, уделяя особое внимание глазам, носу и другим выразительным элементам портрета. Используются алмазные боры на гибком валу, штихели и тонкие иглы. Главная задача этого этапа – устранить «машинность» поверхности: сделать переходы более мягкими, усилить глубину теней, добавить микропластику, которую станок не воспроизводит из-за конечного диаметра фрезы. Третий этап – финишная шлифовка абразивной шкуркой наводе с последовательным повышением номера. На этом этапе достигается требуемая степень гладкости; для участков, которые должны оставаться матовыми, используется пескоструйная обработка через трафарет. Характерно, что мастера, работающие по такой технологии, оценивают своё ремесло не как «доводку» машинной заготовки, а как полноценное творчество.

4. Проблема сохранения традиций в условиях автоматизации
Цифровая трансформация ставит перед системой подготовки кадров сложную дилемму. С одной стороны, растёт потребность в технологах,

владеющих CAD/CAM-системами и понимающих кинематику камнеобрабатывающих станков. С другой стороны, невозможно готовить только технологов: утрата живого навыка ручной резьбы означает необратимую потерю того тактильного и эстетического опыта, который накапливался столетиями.

Выход может быть найден в пересмотре образовательных стандартов для художественно-промышленных училищ и вузов. Базовое обучение должно включать полный цикл ручной резьбы по камню (не менее 500–600 аудиторных часов), поскольку, как убедительно показано в педагогических исследованиях, именно через ручную практику формируется «мышление материалом». Только после освоения ручного инструмента студент должен переходить к изучению цифровых технологий, которые позиционируются не как замена ремеслу, а как его расширение.

В России основные традиции художественной камнеобработки связаны с уральской школой (малахит, яшма, родонит), петербургской школой монументально-декоративной резьбы и московской школой мемориальной пластики. Предпринятое в 2021–2023 годах обследование трёх профильных образовательных учреждений (Уральское училище прикладного искусства, СПбГХПА им. А. Л. Штиглица, Абрамцевский художественно-промышленный колледж) показало, что доля часов на ручные технологии в среднем сократилась с 80 % до 40 % за последние десять лет. Тенденция вызывает обоснованную тревогу.

Синтетический подход к художественной обработке камня, интегрирующий автоматизированное формообразование и ручную финишную доработку, представляет собой наиболее перспективную парадигму развития отрасли. В рамках этого подхода станки с ЧПУ, гидроабразивные установки и лазерные гравёры выполняют функцию «цифрового подмастерья» – они берут на себя трудоёмкие, повторяющиеся операции, требующие высокой точности и временных затрат, но не претендуют на художественную выразительность финальной поверхности. Ручная доработка, напротив, концентрируется на тех участках изделия, где важны индивидуальный почерк, импровизация и тактильный контакт с материалом. Выбор конкретного баланса между машинной и ручной составляющей определяется тиражом, бюджетом и требуемой степенью уникальности. Для единичных выставочных работ ручная обработка может составлять 80–100 % трудозатрат, для массовой продукции – 15–25 %. Ключевым остаётся одно: при любом балансе сохранение живой традиции ручной резьбы является необходимым условием существования камнеобработки как искусства, а не только как индустрии.

Список использованных источников

1. Беляев, А.Н. Психология художественного ремесла: тактильное мышление в камнерезном искусстве / А.Н. Беляев. – Москва: Литературное обозрение, 2017. – 220 с.
2. Ермакова, Т.В. Художественная обработка камня: история, технологии, школы / Т.В. Ермакова. – Москва: Высшая школа, 2018. – 304 с.

3. Соболев, В.С. Современное оборудование для камнеобработки / В.С. Соболев. – Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2021. – 190 с.
4. Carfagni, M., Furferi, R., Governi, L., & Volpe, Y. Digital and hybrid manufacturing of stone products: an overview of current trends // Journal of Cultural Heritage. 2018 vol. 32, pp. 108–119.
5. Hashish, M. Waterjet cutting of natural stone: a review of recent advances // Journal of Water Jet Technology. 2014. vol. 5(2), pp. 110–128.
6. Hamzaoglu, O., Ozkar, M. Computation in stone: a digital reconstruction of Anatolian stone carving // Network Journal. 2017. vol. 19(2), pp. 335–354.
9. McCullough, M. Craft: The Practiced Digital Hand*. Cambridge (MA): MIT Press. 1996. 328 p.

SYNTHESIS OF AUTOMATED AND MANUAL METHODS IN MODERN ARTISTIC STONE PROCESSING: FROM TECHNOLOGICAL PRECISION TO AESTHETIC EXPRESSIVENESS

N.A. Vydrina¹

*Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov,
Arkhangelsk, Russia*

The article examines the problematic field of interaction between manual and machine technologies in artistic stone processing. Unlike works that emphasize the contrast between «craftsmanship and industry,» this article presents a concept of a synthetic approach that views CNC milling, waterjet cutting, and laser engraving not as alternatives to manual labor, but as tools for pre-forming that allow the artist to complete the final artistic adjustments.

Keywords: *artistic stone carving, hybrid technologies, author's product, digital reconstruction of the ornament, finishing, craft identity.*

УДК 736:621.9.02

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ, РЕСУРСНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ХУДОЖЕСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ КАМНЯ

Н.А. Выдрина²

*Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова,
г. Архангельск, Россия*

В статье представлены результаты сопоставительного исследования четырёх технологических подходов к художественной трансформации природного кам-

¹ Scientific supervisor: U.S. Khamraev – Assistant Professor at the Department of Highways and Construction Industry.

² Научный руководитель: У.С. Хамраев – доцент кафедры автомобильных дорог и строительной индустрии.

ня: традиционной ручной резьбы, фрезерования на оборудовании с числовым программным управлением (ЧПУ), гидроабразивного разделения и лазерной гравировки. Ключевыми критериями сравнения выбраны длительность операционного цикла, степень потребления материальных и энергетических ресурсов, а также совокупные производственные издержки.

Ключевые слова: обработка природного камня, фрезерование с ЧПУ, гидроабразивная резка, лазерная абляция, ручная резьба, технологические издержки, ресурсоэффективность.

Художественная обработка камня представляет собой область материального производства, в которой на протяжении нескольких тысячелетий сформировался устойчивый массив технологических приёмов. В последние два десятилетия произошло качественное изменение производственного ландшафта, связанное с широким внедрением цифровых систем управления и высокоэнергетических методов воздействия на материал. Как справедливо отмечает В. С. Соболев в своём обзоре камнеобрабатывающего оборудования, современное производство уже не может рассматриваться исключительно как совокупность ручных операций; напротив, оно всё более ориентируется на сквозное цифровое проектирование и автоматизированное формообразование [4, с. 45]. В этих условиях перед технологами и художниками-прикладниками встаёт задача обоснованного выбора метода обработки в зависимости от поставленных целей. Для массового и серийного производства приоритетными становятся скорость и повторяемость результата, тогда как при создании выставочных или мемориальных изделий на первый план выходят эстетические параметры и уникальность. Существующие публикации, как правило, рассматривают отдельные технологии изолированно либо дают их описательное сравнение без количественной оценки ключевых параметров. Настоящая статья восполняет этот пробел, предлагая анализ по трём измеримым критериям: временные затраты, ресурсная интенсивность и экономическая стоимость.

1. Характеристика исследуемых методов.

Исследование охватывает четыре метода, которые в современной практике художественной камнеобработки встречаются наиболее часто.

Традиционная ручная обработка базируется на использовании ударного и абразивного инструмента: резцов, молотков, шлифовальных камней, а также пневматических молотков. Основной характеристикой метода является полная зависимость конечного результата от квалификации мастера, его опыта и индивидуальной моторной координации. В литературе подчёркивается, что ручная резьба позволяет достичь нюансированной фактуры, недоступной для машинных методов, однако ценой этого становится высокая трудоёмкость [4, с. 112].

Фрезерование на станках с ЧПУ представляет собой процесс удаления материала вращающимся режущим инструментом (алмазными или твёрдосплавными фрезами) по траектории, задаваемой управляющей программой. Программа генерируется на основе трёхмерной модели, созданной в

CAD-системе. Станки с четырьмя и пятью осями координат позволяют формировать сложные рельефы и поднутрения. Как показывает практика, точность позиционирования современных камнеобрабатывающих центров достигает 0,02–0,05 мм [5].

Гидроабразивная резка основана на использовании сверхзвуковой струи водно-абразивной смеси, истекающей из сапфирового или алмазного сопла под давлением 3000–6000 бар. Отсутствие термического воздействия является ключевым преимуществом, поскольку исключает зону термического влияния и микротрещины.

Лазерная гравировка реализуется за счёт локального нагрева поверхности камня сфокусированным лазерным лучом. Для обработки природного камня преимущественно применяются CO₂-лазеры с длиной волны 10,6 мкм, поскольку силикатные минералы имеют полосы поглощения в этом диапазоне. Глубина гравировки обычно не превышает 0,5–1,5 мм, что ограничивает метод плоскостными изображениями и текстурами.

2. Временные параметры технологических процессов.

Сравнение временных затрат проводилось на основе хронометража типовых операций на трёх предприятиях (ООО «Карельский гранит», ООО «Камень-Арт», ИП «Скульптурная мастерская»). Для унификации сравнения в качестве эталонного изделия выбрана барельефная композиция размером 300×400 мм с 15 % площадью углублённых элементов на глубину до 8 мм. Ручная обработка такого изделия квалифицированным резчиком 6-го разряда занимает в среднем 18–22 человеко-часов. Эта оценка включает грубое обкалывание формы, детальную выборку рельефа и финишную шлифовку. При этом качество результата существенно варьируется от мастера к мастеру, что создаёт проблему стандартизации. Фрезерование на трёхосевом станке с ЧПУ (модель Gravion GR-1224, частота вращения шпинделя 18 000 об/мин, фреза диаметром 6 мм) сокращает машинное время до 2,5–3,5 часов. К этому следует добавить время на создание управляющей программы (4–6 часов для оператора средней квалификации), однако при тиражировании десяти и более изделий затраты на программирование распределяются на весь тираж, что делает ЧПУ-обработку экономически оправданной. Гидроабразивная резка того же контура (при условии, что изделие представляет собой сквозной или глубокий прорезной рельеф) требует 1,5–2 часов чистого времени резки. Лазерная гравировка занимает от 20 до 45 минут в зависимости от плотности растрового заполнения. При мощности 100 Вт и скорости 400 мм/с гравировка изображения среднего разрешения (300 dpi) выполняется за 25–30 минут. Однако данный метод неприменим для глубокого рельефа – он даёт лишь поверхностную отметку [3]. Таким образом, по фактору времени ручная обработка уступает автоматизированным методам на один-два порядка. Качественный скачок наблюдается при переходе от ручного труда к любому из машинных методов, а различия между самими машинными методами (особенно между гидроабразивом и лазером) не столь драматичны.

3. Ресурсная интенсивность.

Под ресурсной интенсивностью в данной работе понимается совокупность затрат материалов, энергии и инструмента в расчёте на единицу продукции. Анализ проводился отдельно по каждому методу.

Ручная обработка характеризуется низким потреблением энергии (средняя мощность ручного электроинструмента 0,5–1,5 кВт) и минимальным расходом быстроизнашивающегося инструмента (стальные резцы требуют периодической заточки, но один резец выдерживает до 50–100 часов работы по мрамору). Основным ресурсом здесь выступает человеческий труд, который в современной экономике является наиболее дорогим и дефицитным.

ЧПУ-фрезерование требует установленной мощности оборудования от 5 до 15 кВт. Наибольшую статью расходов составляет режущий инструмент. Алмазные фрезы для обработки гранита имеют ресурс 30–60 часов непрерывной работы, а стоимость одной фрезы достигает 3000–5000 рублей. Для снижения расхода инструмента используется стратегия «черновой проход – чистовой проход», при которой черновая фреза из более стойкого материала выдерживает до 100 часов [6, с. 78].

Гидроабразивная резка демонстрирует самую высокую интенсивность расхода материалов. Основные компоненты: вода (расход 1,5–2 л/мин), абразив (гранатовый песок фракции 80 меш, расход 250–400 г/мин) и изнашиваемые части (сапфировое сопло ресурсом 40–80 часов). Для предприятия, работающего в две смены, ежемесячный расход абразива может достигать 3–5 тонн. При этом затраты электроэнергии также велики: насосы высокого давления потребляют 30–40 кВт. Исследования показывают, что до 60 % себестоимости гидроабразивной резки приходится именно на абразив [8, р. 115].

Лазерная гравировка отличается низким расходом материалов – абразив не требуется, вода используется только для охлаждения лазерного излучателя, а потребляемая мощность (2–5 кВт) значительно ниже, чем у гидроабразива. Однако ресурс лазерной трубки для СО₂-лазеров составляет 3000–8000 часов, после чего требуется замена газонаполненной трубки стоимостью 30000–50000 рублей.

4. Экономическая эффективность.

Экономический анализ выполнен с учётом капитальных затрат, операционных расходов и амортизационных отчислений. Расчёт производился для гипотетического предприятия со средним объёмом выпуска 500 изделий в год (эталонная барельефная композиция). Капитальные затраты распределены следующим образом. Оснащение одного рабочего места для ручной обработки качественным инструментом (включая пылеудаление и верстак) составляет 150–200 тыс. рублей. Фрезерный станок с ЧПУ для камня (рабочее поле 1200×1200 мм) обходится в 1,5–2,5 млн рублей. Гидроабразивная установка аналогичного рабочего поля стоит 3,5–5 млн рублей. Лазерный гравировальный станок мощностью 100 Вт – 350–500 тыс. рублей.

Операционные расходы на одно изделие (без учёта заработной платы управленческого персонала и аренды) составили: ручная обработка: 3200 руб. (95 % – оплата труда резчика); ЧПУ-фрезерование: 1100 руб. (инструмент – 500 руб., электроэнергия – 200 руб., амортизация – 400 руб.); гидроабразивная резка: 2050 руб. (абразив – 1300 руб., электроэнергия – 350 руб., амортизация и сопла – 400 руб.); лазерная гравировка: 280 руб. (электроэнергия и амортизация, без учёта ограниченной глубины).

Как видно из расчётов, лазерная гравировка наиболее экономична для тех задач, которые она способна решить. Однако для объёмных форм её применение невозможно. Фрезерование с ЧПУ обеспечивает оптимальное соотношение цены и возможности создания трёхмерного рельефа. Гидроабразивная резка оказывается самой дорогой, но незаменимой для термочувствительных материалов (травертин, некоторые разновидности известняка) и для получения идеально гладкой кромки без сколов.

Проведённый анализ позволяет сформулировать следующие положения. Ручная обработка сохраняет целесообразность только в двух случаях: при создании единичных художественных произведений, где цена ошибки (в художественном смысле) несоизмерима с затратами, и при необходимости выполнения сложных поднутрений, недоступных для трёхосевых станков с ЧПУ. Для большинства тиражных задач фрезерование с ЧПУ является наиболее сбалансированным выбором. Гидроабразивная резка представляет собой нишевую технологию, оптимальную для толстых заготовок (более 50 мм) и материалов, чувствительных к нагреву или вибрации. Лазерная гравировка наиболее эффективна для маркировки, портретной гравировки и нанесения сложных орнаментов, но непригодна для глубокого рельефа.

Список использованных источников

1. Беляев, А.Н. Психология художественного ремесла: тактильное мышление в камнерезном искусстве / А.Н. Беляев. – Москва: Литературное обозрение, 2017. – 220 с.
2. Булавкин, А.А. Технологические комплексы на базе гидроагрегате усвд-3500 для контурной резки камня / А.А. Булавкин, Н.М. Семёшин, М.Г. Шеметов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2000. – №3. – С. 105-106.
3. Ермаков, М.П. Основы дизайна. Художественная обработка твердого и мягкого камня/ М.П. Ермаков – Ростов-на-Дону: Феникс, 2016. – 654 с.
4. Ермакова, Т.В. Художественная обработка камня: история, технологии, школы / Т.В. Ермакова. – Москва: Высшая школа, 2018. – 304 с.
5. Илалова, Г.Ф. Художественная обработка камня / Г.Ф. Илалова, Р.Р. Хасаншин, В.В. Губернаторов. – Казань: Школа, 2020. – 107 с.
6. Соболев, В.С. Современное оборудование для камнеобработки / В.С. Соболев. – Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2021. – 190 с.
7. Carfagni, M., Furferi, R., Governi, L., & Volpe, Y. Digital and hybrid manufacturing of stone products: an overview of current trends // Journal of Cultural Heritage. 2018 vol. 32, pp. 108–119.
8. Hashish, M. Waterjet cutting of natural stone: a review of recent advances // Journal of Water Jet Technology. 2014. vol. 5(2), pp. 110–128.

9. Hamzaoglu, O., Ozkar, M. Computation in stone: a digital reconstruction of Anatolian stone carving // Network Journal. 2017. vol. 19(2), pp. 335–354.
10. McCullough, M. Craft: The Practiced Digital Hand. Cambridge (MA): MIT Press. 1996. 328 p.

COMPARATIVE ANALYSIS OF TIME, RESOURCE AND ECONOMIC PARAMETERS OF MODERN METHODS OF ARTISTIC STONE PROCESSING

N.A. Vydrina¹

*«Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov»,
Arkhangelsk, Russia*

The article presents the results of a comparative study of four technological approaches to the artistic transformation of natural stone: traditional hand carving, milling on equipment with numerical control (CNC), waterjet separation and laser engraving. The key comparison criteria are the length of the operating cycle, the degree of consumption of material and energy resources, as well as total production costs.

Keywords: *natural stone processing, CNC milling, waterjet cutting, laser ablation, manual carving, technological costs, resource efficiency.*

УДК 331.45:658.382

УПРАВЛЕНИЕ НАДЁЖНОСТЬЮ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ КАК ФАКТОР СНИЖЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТРАВМАТИЗМА

А.И. Газизова, Р.Н. Пигилова

*Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия*

Проанализирована роль человеческого фактора в возникновении аварий и травматизма на промышленных предприятиях. Показано, что большинство инцидентов связано не с отказом техники, а с ошибочными действиями персонала. Выделены три группы факторов, снижающих надёжность оператора: психофизиологические ограничения, неблагоприятные условия труда и недостатки в организации производственных процессов. Особое внимание уделено латентным (скрытым) ошибкам, создающим предпосылки для тяжёлых аварий.

Ключевые слова: *безопасность жизнедеятельности, эргатическая система, человеческий фактор, надёжность, производственный травматизм, латентные ошибки, управление рисками.*

Автоматизация современных производств не снижает значимости человеческого звена. Напротив, усложнение техники повышает цену

¹ 2Scientific supervisor: U.S. Khamraev – Assistant Professor at the Department of Highways and Construction Industry.

любой ошибки оператора. Согласно данным исследования Власовой и соавторов [1], от 65 до 80 процентов аварий на промышленных объектах прямо или косвенно спровоцированы действиями персонала. Не столько техника отказывает, сколько человек ошибается. В этой связи проблема надёжности эргатических систем приобретает не теоретическое, а сугубо прикладное значение. Под эргатической системой понимается триада «оператор – машина – среда», где каждый компонент влияет на два других.

В технике надёжность определяется через статистику отказов и наработку на отказ. Применительно к человеку такой подход не работает. Ошибка оператора редко бывает случайной. Чаще всего она обусловлена комплексом взаимосвязанных причин. К первой группе относятся психофизиологические особенности конкретного работника: скорость реакции, объём оперативной памяти, устойчивость внимания. Ко второй – неблагоприятные параметры производственной среды: шум, вибрация, недостаточная освещённость, отклонения температуры и влажности. К третьей – недостатки в организации труда: нерациональные графики сменности, отсутствие регламентированных перерывов, нечёткие или противоречивые инструкции.

Особого внимания заслуживают латентные ошибки, то есть скрытые сбои, которые не приводят к немедленной аварии, но создают для неё предпосылки. Классический пример: рабочий не сообщил мастеру о неисправности предохранительного клапана из-за боязни выговора. Клапан продолжает эксплуатироваться ещё несколько недель, затем выходит из строя, и происходит выброс опасного вещества. Формально виноват тот, кто не провёл своевременный осмотр. Реальная же первопричина – страх санкций, сформированный жёсткой карательной дисциплиной.

Система должна быть выстроена так, чтобы работнику было выгоднее сообщить об ошибке, чем скрыть её. Один из работающих механизмов – так называемые стоп-карты, то есть право любого сотрудника остановить технологический процесс при обнаружении неопределённости или нештатной ситуации. Похожая практика давно и успешно применяется в авиации, где каждое отклонение фиксируется и анализируется без персональных взысканий (за исключением случаев умысла или грубой халатности).

Практические мероприятия по повышению надёжности эргатической системы логично группировать по трём направлениям.

Первое направление – техническое. Задача здесь состоит в том, чтобы ошибиться было физически трудно. Например, аварийная кнопка останова должна быть крупнее и ярче остальных органов управления. Опасные команды следует дублировать звуковым подтверждением. На прессовом оборудовании стоит применять двухручное включение, исключающее случайный пуск при нахождении рук в рабочей зоне.

Второе направление – организационное. Оно касается режима труда и отдыха. Как показывают наблюдения Жуковой с соавторами [2], после восьмого часа непрерывной работы вероятность ошибки возрастает примерно на 40 процентов, а после двенадцатого – более чем вдвое. Простое и эффективное решение – введение коротких перерывов по пять-десять минут через каждые два часа. Другой приём – ротация персонала на монотонных операциях. Если человек часами выполняет одно и то же движение, внимание неизбежно притупляется. Смена вида деятельности восстанавливает остроту восприятия.

Третье направление – психологическое и методическое. Сюда входят профессиональный отбор с оценкой стрессоустойчивости, регулярные тренировки на компьютерных тренажёрах и командные тренинги. Тренажёрная подготовка заслуживает отдельного упоминания. Когда оператор в спокойной обстановке многократно проигрывает аварийные ситуации, в реальной аварии он действует автоматически, без паники и заминок. Зарубежный опыт свидетельствует, что затраты на тренажёры окупаются после первого же предотвращённого инцидента [3].

Для оценки эффективности описанного подхода можно привести конкретный пример. На одном из машиностроительных предприятий Приволжского федерального округа в течение полугода проводилась программа повышения надёжности на сборочном участке. Были выполнены следующие мероприятия: замена устаревшего пульта управления на эргономичный, введение двух дополнительных десятиминутных перерывов в течение смены, организация еженедельного разбора мелких сбоев в формате «без имён и наказаний» – анализировались только факты и причины. Результаты: количество зафиксированных микротравм снизилось с двенадцати до трёх за полугодовой период, число нарушений технологической последовательности операций уменьшилось на 62 процента. Производительность при этом не упала, а даже немного выросла за счёт сокращения простоев по причине мелкого травматизма.

Единой инструкции на все случаи жизни, конечно, не существует. На каждом предприятии свой набор проблем. На одном главным врагом оказывается усталость от ночных смен, на другом – плохая эргономика рабочих мест, на третьем – низкая квалификация или текучесть кадров. Важно другое: управление надёжностью эргатической системы нельзя сводить к разовым акциям вроде месячника охраны труда. Это непрерывный процесс, включающий регулярную идентификацию слабых мест, подбор корректирующих воздействий, контроль их эффективности и последующую корректировку.

Косорукова и Косоруков [3] справедливо указывают, что игнорирование человеческого фактора при проектировании технологических процессов неизбежно оборачивается накоплением латентных дефектов. А любое накопление латентных дефектов рано или поздно приводит к тяжёлому инциденту. Задача специалиста в области безопасности жизне-

деятельности – разорвать эту деструктивную цепочку на самой ранней стадии.

Перспективы дальнейших исследований автор видит в разработке количественных моделей оценки эргономических рисков. Целесообразно иметь расчётные формулы, позволяющие прогнозировать, как именно повышение освещённости на 50 люкс или добавление десяти минут к обеденному перерыву скажется на вероятности ошибки.

Таким образом, как подчёркивается в работе [4], ключевой вывод состоит в следующем: любое вложение средств в профилактику человеческих ошибок – будь то эргономичный пульт, дополнительный перерыв или тренажёр – экономически оправдано. Цена тяжелой аварии неизмеримо выше затрат на проектирование безопасной эргатической системы. Именно этот экономический аргумент должен стать главным двигателем изменений на производстве, а не только требования нормативных документов.

Список использованных источников

1. Власова Е.С., Окулова М.Л., Завьялова Ю.В., Песков М.В. Анализ влияния человеческого фактора на подпроцессы перевозочной деятельности на железнодорожном транспорте // Наука и техника транспорта. – 2023. – № 2. – С. 86–90
2. Жукова Г.В., Сутормин О.С., Степанова Л.В., Кратасюк В.А. Прогнозирование профессиональной успешности работника в условиях воздействия трудовых нагрузок: новый подход // Физиология человека. – 2024. – Т. 50. № 5. – С. 87–94.
3. Косорукова Е.А., Косоруков А.С. Оценка влияния человеческого фактора на выполнение ключевых показателей эффективности транспортной компании // Управленческий учет. – 2025. – № 7.
4. Люханова С.В. Оценка персонала в современных условиях: эффект, проблемы, перспективы // Менеджмент в России и за рубежом. – 2020. – № 3. – С. 70–79.

MANAGEMENT OF ERGATIC SYSTEMS RELIABILITY AS A FACTOR OF INDUSTRIAL INJURIES REDUCTION

A.I. Gazizova, R.N. Pigilova

*Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia*

The role of the human factor in the occurrence of accidents and injuries at industrial enterprises is analyzed. It is shown that most of the incidents are not related to equipment failure, but to erroneous actions of personnel. Three groups of factors that reduce the reliability of the operator are identified: psychophysiological limitations, unfavorable working conditions and shortcomings in the organization of production processes. Special attention is paid to latent (hidden) errors that create prerequisites for serious accidents. Technical, organizational and methodological measures are proposed to increase the stability of the ergatic system. An example of the implementation of such measures at a machine-building enterprise is given.

Keywords: safety of life, ergatic system, human factor, reliability, occupational injuries, latent errors, risk management.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ РУЧНОЙ И АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ В АВТОМОБИЛЕСТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

Б.И. Гильфанов¹, Р.И. Давлетшин²

*Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия*

В статье анализируются особенности и эффективность ручной и автоматизированной сборки в автомобилестроительной отрасли России. Сравниваются ключевые показатели производительности, качества, гибкости и экономических затрат. Выявляется, что ручная сборка предпочтительна для мелкосерийного производства с высокой вариативностью, в то время как автоматизированная обеспечивает стабильность и рост производительности в массовом выпуске, с оптимальным эффектом при их комбинированном применении в гибких системах.

Ключевые слова: автомобилестроение, ручная сборка, автоматизированная сборка, производительность, качество продукции.

Сборка в автомобилестроении традиционно относится к числу наиболее трудоемких этапов производственного цикла, поскольку именно здесь формируется конечное качество изделия. В современных условиях оценка ручной и автоматизированной сборки выходит за рамки простого противопоставления традиционного и современного подходов. Это две разные технологические концепции со своими нишами применения. Автоматизация наиболее выгодна там, где номенклатура узлов стабильна, операции повторяются, а конструкция допускает унификацию. Однако при активном внедрении роботов ручной труд все равно остается востребованным для задач, требующих тактильной точности, визуальной оценки и корректировки дефектов.

Ручная сборка отличается высокой гибкостью, которая позволяет быстро перестраивать производство при смене модели, модификации узлов или переходе к малосерийному выпуску. Это особенно важно для предприятий с часто меняющейся программой и расширяющейся номенклатурой. Она также целесообразна при необходимости локальной подгонки сопрягаемых поверхностей, соединения элементов сложной геометрии и корректировки отклонений размеров. Однако такая гибкость сопряжена с высокой зависимостью от квалификации и физического состояния рабочего, а также соблюдения технологической дисциплины, что ведёт к вариативности качества и снижению устойчивости производительности по сравнению с автоматизированной сборкой.

Автоматизированная сборка в автомобилестроении базируется на промышленных роботах, конвейерных линиях и системах контроля. Это

^{1, 2} Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент Богданова Н.В.

ускоряет производство, снижает потребность в высококвалифицированном ручном труде и улучшает условия работы персонала. Высокая повторяемость и стандартизация операций в изготовлении кузовов, силовых агрегатов и типовых узлов делают автоматизацию особенно эффективной для отрасли. Автоматизированные линии обеспечивают точное соблюдение траектории, снижая вероятность дефектов. Наибольший эффект достигается в массовом и крупносерийном производстве, где капитальные затраты распределяются на большой объём выпуска.

Сравнение эффективности двух подходов показывает, что ручная сборка выигрывает по показателям адаптивности и первоначальной дешевизны организации процесса, тогда как автоматизированная – по производительности, повторяемости и долговременной экономической результативности. Это различие особенно заметно при оценке времени цикла и объема брака. В роботизированных системах время выполнения операции в меньшей степени зависит от индивидуальных особенностей исполнителя, а качество соединений определяется программно заданными параметрами.

Однако эффективность автоматизированной сборки не следует понимать исключительно как технологическое превосходство. Её внедрение требует значительных инвестиций в оборудование, ПО и инфраструктуру обслуживания. Проблемы возникают при недостаточной технологичности изделия, например, из-за нестабильности размеров деталей или отсутствия унификации соединений. В таких случаях автоматизация повышает издержки, а не эффективность. Конструкция, хорошо поддающаяся ручной сборке, может оказаться непригодной для автоматизации без обеспечения точности базирования, унификации деталей и стабильности размерных цепей. Следовательно, выбор способа сборки необходимо определять на стадии проектирования изделия, а не только при организации производства.

На практике в автомобилестроении наиболее рациональным является смешанный вариант, при котором автоматизированные операции сосуществуют с ручными. Автоматизация обычно охватывает трудоемкие, однотипные и высокочастотные действия: подачу деталей, установку типовых элементов, затяжку крепежа, сварочные и контрольные операции. Ручной труд сохраняется на этапах, где требуется визуальная оценка, сложная подгонка, нестандартная ориентация деталей или доработка узлов. Такой подход позволяет совместить производительность машинной сборки с адаптивностью человека. Рациональный уровень автоматизации должен подбираться с учетом технических и экономических критериев, а не по принципу максимального охвата операций.

Особое значение в автомобилестроении имеет влияние автоматизации на качество продукции. Она минимизирует отклонения, неизбежные при ручной сборке из-за усталости персонала, разного уровня квалификации и разночтений в трактовке требований. Строго контролируемые режимы и выполнение операций по заданной программе особенно важны для соеди-

нений с жёсткими параметрами: усилием запрессовки, последовательностью установки, моментом затяжки и взаимным положением элементов. При этом риск серийных дефектов из-за программных ошибок или сбоев датчиков требует обязательного дополнения автоматизированной сборки системами диагностики и контроля качества.

Экономическая оценка показывает, что преимущества автоматизации проявляются не сразу, а в среднесрочной и долгосрочной перспективе. При малых объёмах выпуска затраты на роботизацию часто не окупаются из-за высокой амортизации и стоимости обслуживания. В массовом производстве, напротив, окупаемость обеспечивают высокая загрузка линий, повторяемость операций и длительный жизненный цикл модели. Обоснованный выбор объектов автоматизации критически важен для предприятий с ограниченным бюджетом и нестабильным спросом. Попытка тотальной автоматизации может привести к убыткам вместо экономии.

Таким образом, сравнительный анализ показывает, что ручная и автоматизированная сборка являются взаимодополняющими моделями. Ручная сборка отличается гибкостью и меньшей капиталоемкостью, оптимальна для малых серий и частой смены модификаций. Автоматизированная сборка обеспечивает высокую производительность и стабильность качества, но требует существенных вложений и технологичных изделий. Наиболее перспективно для автомобилестроения развитие гибридных линий: роботы выполняют повторяемые и трудоёмкие операции, а человек – контроль, адаптацию и работу с нестандартными задачами. Такой подход сочетает технологическую рациональность, экономическую обоснованность и устойчивое качество продукции.

Список использованных источников

1. Мартынов, В.Г. Роботизация и автоматизация сборочных процессов в современном промышленном производстве / В.Г. Мартынов // Техника и технологии: пути инновационного развития: материалы 3-й Международной научно-практической конференции, Курск, 29 июня 2013 года / Ответственный редактор Горохов А.А.. – Курск: Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2013. – С. 120-123. – EDN TJAZHT.
2. Сейтказы, Н.С. Автоматизация производственных процессов / Н.С. Сейтказы // Научный альманах. – 2020. – № 11-2(73). – С. 100-103. – EDN VSJDOJ.
3. Филиппов, М.А. Оценка преимуществ автоматизированной сварки / М.А. Филиппов, В.С. Марин, В.П. Третьяков // Инновационные идеи в машиностроении: Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, Санкт-Петербург, 24–26 мая 2022 года / Под редакцией А.А. Поповича, Д.П. Гасюка. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – С. 561-565. – EDN LECFQY.
4. Фролова, Н.А. Автоматизация производственных процессов в машиностроении: учеб.-метод. пособие по изучению дисциплины для студ. бакалавриата по напр. подготовки 15.03.01 Машиностроение / Н.А. Фролова. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2023. – 38 с.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF MANUAL AND AUTOMATED ASSEMBLY METHODS IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

B.I. Gilfanov¹, R.I. Davletshin²

*Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia*

The article analyzes the features and effectiveness of manual and automated assembly in the Russian automotive industry. Key indicators of productivity, quality, flexibility and economic costs are compared. It is revealed that manual assembly is preferable for small-scale production with high variability, while automated assembly ensures stability and productivity growth in mass production, with optimal effect when combined in flexible systems.

Keywords: automotive industry, manual assembly, automated assembly, productivity, product quality.

УДК 621.315.2:614.84

ОБЗОР МЕХАНИЗМОВ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ МУФТ КАБЕЛЕЙ ВЫСОКОГО НАПЯЖЕНИЯ

А.Р. Гиниятов

*Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия*

Статья посвящена проблеме взрывов промежуточных соединений высоковольтных кабелей. Показано, что кабельные аксессуары являются самым слабым звеном кабельных линий, а вероятность отказа соединений достигает 85,5%. Описан динамический процесс эволюции взрыва: от частичных разрядов (ЧР) по причине дефектов (царапины, воздушные зазоры, заусенцы, проникновение воды) к пробой дуги, термоэлектрическому разложению изоляционных материалов (XLPE и SiR) с образованием горючих газов (CH_4 , H_2 , C_2H_4), развитию канала пробы к медной оболочке и, наконец, взрыву и пожару.

Ключевые слова: высоковольтные кабели, промежуточные соединения, взрыв, частичные разряды, пробой дуги.

Цель статьи состоит в том, чтобы проанализировать динамический процесс развития отказа промежуточных соединений высоковольтных кабелей от образования дефектов до окончательного разрушения взрывного типа (взрыв), рассмотреть существующие методы обнаружения дефектов и меры предотвращения разрывов, а также предложить перспективные направления для повышения безопасности кабельных линий.

^{1 2}Scientific supervisor: Candidate of Technical Sciences, Associate Professor Bogdanova N.V.

Введение. С развитием городов высоковольтные кабели всё шире применяются в сетях электроснабжения. По состоянию на 2021 год длина высоковольтных кабелей (66 кВ и выше) в Китае превысила 35 000 км. Однако статистика показывает, что вероятность отказа кабельной арматуры достигает 85,5%, что делает их самым слабым звеном кабельных линий. Кабельные муфты подвержены дефектам в процессе производства и установки из-за сложности конструкции. За последние годы произошло множество взрывов соединений высоковольтных кабелей, которые привели к значительным экономическим потерям, пожарам в кабельных туннелях и даже угрозе для жизни персонала. Большинство существующих исследований дают неполное объяснение механизмов взрыва, описывая процесс статично, без понимания механизма развития от дефекта до разрыва [1].

Основная часть. Конструкция интегрированного сборного кабельного соединения на 220 кВ включает обжимную трубку, конус напряжения, высоковольтную экранирующую трубку, основной изоляционный компонент из силиконовой резины (SiR), защитную медную оболочку и герметик. Слабыми точками внутри соединения являются конус напряжения, конец высоковольтной экранирующей трубки и интерфейс между изоляцией XLPE и SiR, где происходит искажение электрического поля [2]. Максимальная напряжённость поля в этих зонах достигает $4,2 \times 10^7$ В/м. Взрыв – это динамический процесс, проходящий несколько ключевых этапов. Всё начинается с частичных разрядов (ЧР) внутри соединения. Причины ЧР – дефекты, возникающие при производстве или установке: царапины на основной изоляции, воздушные зазоры на границе соединения, проникновение воды, заусенцы на сборных резиновых компонентах [3]. Диэлектрическая проницаемость газа значительно ниже, чем у изоляционных материалов, что делает газовые полости особенно подверженными разряду. Перенапряжения в сети могут увеличивать напряжённость поля почти на 100%, ускоряя развитие ЧР. Для обнаружения дефектов на стадии частичного разряда используются три основных метода. Метод высокочастотного тока (HFCT) прост в установке, но применим только при наличии заземляющей линии и обладает слабой помехоустойчивостью [4]. Метод ультравысоких частот (UHF) эффективно избегает низкочастотных помех, но сигналы быстро затухают при распространении по кабелю. Метод акустической эмиссии (АЕ) мало подвержен электромагнитным помехам, однако акустические сигналы быстро ослабевают, поэтому метод применяется в основном для локального обнаружения вблизи соединения [5]. Когда повреждение изоляционного материала достигает критического порога, частичный разряд переходит в пробой дуги. Развития дефекта включает радиальный дуговой пробой (между обжимной трубкой/сердечником кабеля и медной оболочкой) и осевой разряд (между высоковольтной экранирующей трубкой и конусом напряжения по интерфейсу XLPE-SiR) [6]. Для расчета параметров дуги используются модели «чёрного ящика»: для низкоомного состояния плазмы до перехода тока через ноль и высокоомного

состояния плазмы. Однако существующие модели требуют калибровки большим количеством экспериментальных данных [7]. Высокотемпературная дуга вызывает термоэлектрическое разложение изоляционных материалов. Исследования показывают, что при частичных разрядах XLPE образует только CO и CO₂. При дуговом разряде (ток 30–40 мА) продукты включают CO, CO₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₄, C₂H₂ и H₂. Пиролиз силиконовой резины при температурах 4000–10000 К даёт CH₄, H₂, C₂H₄, C₂H₂ и H₂O. Таким образом, в замкнутом объёме соединения накапливаются горючие газы под высоким давлением. Канал пробоя развивается к защитной медной оболочке, которая под воздействием высокотемпературных газов высокого давления разрывается. Горючие газы выходят наружу, реагируют с кислородом воздуха и воспламеняются, вызывая взрыв и интенсивное горение. Энергия взрывной ударной волны может быть оценена косвенно через избыточное давление, но точный расчёт затруднён из-за зависимости от формы волны тока [8]. Существующие меры предотвращения пожаров и взрывов включают огнестойкие и взрывоустойчивые перегородки (часто в комбинации с огнетушащими гранулами), защитные коробки (пластиковые, стекловолоконные, из алюминиево-магниевого сплава) и гибкие огнезащитные одеяла [9]. Защитные коробки из алюминиево-магниевого сплава обеспечивают хорошую защиту, но занимают много места и могут снижать пропускную способность тока из-за ухудшения теплоотвода. Стекловолоконные коробки хрупкие и не выдерживают мгновенного удара взрыва. Экспериментальные проверки показали, что существующие взрывозащитные меры не всегда выдерживают удар тока короткого замыкания и длительное горение, и риск воспламенения соседних кабелей сохраняется [10].

Заключение. Взрыв промежуточных соединений высоковольтных кабелей – это динамический процесс, включающий последовательные этапы: образование дефектов → частичный разряд → пробой дуги → термоэлектрическое разложение XLPE и SiR с образованием горючих газов → развитие канала пробоя к медной оболочке → разрыв оболочки → выход газов и взрывное горение. Текущие методы обнаружения дефектов (HFCT, UHF, AE) имеют ограничения по помехоустойчивости и точности идентификации типов дефектов. Существующие меры взрывозащиты в основном направлены на минимизацию последствий уже произошедшего взрыва и обладают ограниченной эффективностью. Перспективные направления включают: повышение точности и практичности методов раннего обнаружения дефектов; учёт эффекта электротермического взаимодействия при анализе разложения изоляционных материалов; проведение экспериментов с реальными соединениями для точного определения состава газов; разработку мер фундаментального предотвращения взрывов – подавление развития электрической дуги или координация с релейной защитой для надёжного отключения линии до взрыва соединения. Также необходимо создание взрывозащитных изделий, способных выдерживать высокие температуры и ударные нагрузки.

Список использованных источников

1. Gataullin A.M. Insulators electrical strength estimation under ac applied voltage. В сборнике: Proceedings – 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2019. 2019. С. 35-39.
2. Вэй Ф. Проектирование линии передачи на основе высоковольтного кабеля. Электрон. Технол. 2022, 51, 266–267.
3. Ли С.; Ван, С.; Янг, Л.; Чжао, Дж.; Цзин, З. Важные свойства и фундаментальные проблемы перекрёстных полиэтиленовых изоляционных материалов, используемых в кабелях высокого напряжения. Процесс CSEE 2022, 42, 4247–4255.
4. Gataullin A.M., Gubaev D.F., Khusnutdinov R.R. Automation of high-voltage electrical equipment insulators diagnostics by partial discharges method. В сборнике: Proceedings – 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021. 2021. С. 58-62.
5. Хонг Дж.; Хе, В.; Хе, Х.; Янг, Т.; Ли, Х. Исследования по моделированию электрических полей изоляционных дефектов промежуточных соединений кабеля и обнаружении частичного разряда в камере разряда. Power Syst. Чистая энергия 2019, 35, 56–61.
6. Gataullin A.M., Gubaev D.F., Gataullina R.V. Software and hardware system of monitoring high-voltage electric equipment based on the analysis of partial discharge characteristics. В сборнике: International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Proceedings. 2023. С. 171-176.
7. Хуанг Ф.; Го, Дж.; Танг, Дж. Анализ причин и превентивные меры для неисправности промежуточного соединения кабеля XLPE напряжением 110 кВ. Река Хуншуй 2018, 37, 63–65.
8. Gataullin A.M. Online monitoring of the porcelain insulator units state. В сборнике: 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020. 2020. С. 9271631.
9. Кан Ё.; Гао, С.; Рен, Х.; Фэн, З. Анатомический анализ на промежуточном соединении троса напряжением 220 кВ. Хубэй Электрик. Power 2023, 47, 40–45.
10. Gataullin A.M. Online technology of insulators condition monitoring in smart grid power supply systems. В сборнике: 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019. 2019. С. 8934770.

OVERVIEW OF DAMAGE MECHANISMS OF INTERMEDIATE COUPLINGS OF HIGH VOLTAGE CABLES

A.R. Giniyatov

*Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia*

The article is devoted to the problem of explosions of intermediate connections of high-voltage cables. It is shown that cable accessories are the weakest link in cable lines, and the probability of connection failure reaches 85.5%. The dynamic process of explosion evolution is described: from partial discharge (PD) due to defects (scratches, air gaps, burrs, water penetration) to arc breakdown, thermoelectric decomposition of insulating materials (XLPE and SiR) with the formation of flammable gases (CH_4 , H_2 , C_2H_4), the development of a breakdown channel to the copper shell and, Finally, the explosion and the fire.

Keywords: *high-voltage cables, intermediate connections, explosion, partial discharges, arc breakdown.*

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ: ДОСТИЖЕНИЯ И НАПРАВЛЕНИЯ НА БУДУЩЕЕ

А.Р. Гиниятов

*Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия*

Статья посвящена обзору методов мониторинга состояния и диагностики повреждений электрических машин. Показано, что непредвиденные простои оборудования могут привести к значительным финансовым потерям, что делает раннее выявление неисправностей критически важным. Исследованы традиционные и современные методы диагностики, включая методы с применением искусственных нейронных сетей. Рассмотрены перспективы развития диагностики и мониторинга состояния электрических машин.

Ключевые слова: электрические машины, мониторинг состояния, диагностика неисправностей, обработка сигналов, искусственные нейронные сети.

Цель статьи – представить систематизированный обзор современных методов мониторинга состояния и диагностики неисправностей электрических машин, включая классификацию неисправностей, традиционные и подходы применением методов искусственного интеллекта, машинного обучения, а также определить перспективные направления развития этой области.

Введение. Изучение механизмов обнаружения неисправностей электрических машин (ЭМ) имеют давнюю историю. Ранее были в основном относительно простые системы защиты от перегрузки по току, перенапряжений, замыканий на землю. Однако, с ростом сложности оборудования возросла потребность в более совершенных методах диагностики. Непредвиденный простой может нарушить график и привести к значительным финансовым потерям, поэтому раннее выявление неисправностей стало критически важным. Долговечность электрических машин зависит от типа конструкции, условий эксплуатации и области применения. Долгое время основными механизмами контроля были тепловой и вибрационный мониторинг, а также диагностика по месту установки ЭМ. Но ограничения точности локализации дефектов, низкая чувствительность, сложность диагностики побудили исследователей разрабатывать новые методы: анализ рассеянного потока, переходных процессов, интеллектуальные алгоритмы и прогнозирование неисправностей. Традиционное оперативное и профилактическое обслуживание неоптимально, поскольку первый метод диагностики реагирует на уже случившийся сбой, второе нарушает технологический процесс отключениями приложенного напряжения на период планово-профилактических работ (ППР). Современные подходы включают машинное обучение, включая глубокое машинное обучение, методы прогнозирования и управления оборудованием по его фактическому состоянию, а также применение многозадачных датчиков, систем и цифровых двойников [1].

Основная часть. Неисправности ЭМ делятся на несколько категорий. Электрические неисправности – наиболее частые, возникают из-за повреждения изоляции, коротких замыканий, обрыва цепи, изменения фазы, синфазных и несущих токов. Механические неисправности – вторые по распространённости, связаны с подшипниками, перекосом вала, несбалансированными нагрузками, повреждениями поверхности стержня ротора и его эксцентриситетом [2]. Тепловые неисправности возникают из-за перегрева, разрушения изоляции и перегрузок. Неисправности, связанные с окружающей средой, вызываются влагой на поверхности деталей ЭМ, пылью и повышенной влажностью окружающей среды, приводя к появлению ржавчины металлических деталей. Неисправности узлов управления связаны со сбоями программного обеспечения, датчиков или источников питания. В ЭМ с постоянными магнитами дополнительно выделяют размагничивание и повреждение магнитов [3]. Традиционные методы мониторинга ЭМ включают тепловой контроль – измерение температуры для предотвращения разрушения изоляции, хотя в некоторых производственных средах (заводы горячей прокатки) тепловизионные результаты могут искажаться. Мониторинг крутящего момента в воздушном зазоре позволяет выявлять механический дисбаланс, перекосы и износ подшипников [4]. Мониторинг шума использует акустические выбросы, но его точность снижается из-за шума от дополнительных машин. Анализ вибрации – широко применяемый метод, однако определение причины неисправности остаётся сложной задачей, так как вибрацию могут генерировать и двигатель, и рабочий орган [5]. Спектральный анализ, прежде всего анализ частотных характеристик тока двигателя, фокусируется на исследовании тока статора для выявления повреждённых стержней ротора, эксцентриситета и коротких замыканий, требует всего одного датчика тока, но имеет низкую точность разрешения по частоте и амплитуде. Анализ сигналов в частотной области расширяет возможности диагностики ЭМ. Быстрое преобразование Фурье – базовый метод получения диагностической информации, но имеет свои недостатки с точки зрения анализа сигнала во временной области [6]. Кратковременное преобразование Фурье выполняет частотно-временной анализ нестационарных сигналов, однако его точность одинакова во всём диапазоне, что неоптимально для переходных процессов. Распределение Вигнера–Вилля обеспечивает высокое разрешение, но страдает от перекрёстной интерференции. Вейвлет-преобразование (WT) обеспечивает лучшую временную локализацию на высоких частотах и широко используется для диагностики неисправностей машин благодаря адаптивной способности к нестационарным сигналам [7]. Преобразование Гильберта–Хуанга (ННТ) объединяет эмпирическую модовую декомпозицию (EMD) и преобразование Гильберта, не завися от выбора оконных параметров, что делает его очень эффективным для динамического анализа. Эмпирическая декомпозиция режимов (EMD) адаптивно разлагает сигнал на функции внутреннего режима, выделяя различные паттерны неисправностей. Циклостационарный анализ фокусируется на циклических свойст-

вах сигналов, вычисляя циклические автокорреляции и спектры [8]. Методы, основанные на схемах замещений, включают моделирование много-связных цепей с функциональным подходом к обмотке, что позволяет учитывать пространственные гармоники и эксцентриситеты, хотя обычно игнорируются насыщение, поверхностный эффект и ёмкости между обмотками. Модели на основе магнитных цепей обеспечивают умеренную вычислительную сложность и могут работать в реальном времени, но их точность в переходных режимах ограничена [9]. Конечно-элементное моделирование (МКЭ) даёт наиболее точное представление о полезном сигнале, но требует огромных вычислительных затрат – часы или даже дни, связанные с решением уравнений Максвелла. Гибридные модели, объединяющие МКЭ с аналитическими подходами, сокращают время вычислений на 95–98% при сохранении достаточной точности. Интеллектуальные методы диагностики всё активнее внедряются на практике. Искусственные нейронные сети (ИНН) с входными данными от датчиков тока, напряжения, температуры и вибрации позволяют выявлять сложные закономерности неисправностей. Нечеткие и адаптивно-нечеткие системы имитируют человеческое восприятие, используя лингвистические переменные и правила типа «если-то», однако требуют больших объёмов данных и сложны в настройке. Методы опорных векторов (SVM) быстрее и точнее ИНН при меньших рисках, особенно при ограниченных наборах данных. Экспертные системы объединяют базу знаний с механизмами логического вывода, но их разработка сложна и дорогостояща [10].

Заключение. Диагностика ЭМ эволюционировала от простых защит до интеллектуальных многодатчиковых систем. Традиционные методы дополняются новыми подходами в обработке сигналов, моделировании и ИНС. Перспективы включают: интеграцию с интернетом вещей для удаленного мониторинга, создание цифровых двойников для предиктивной диагностики, дистанционные методы контроля (ЧР, включая акустический, электромагнитный диапазоны вторичного излучения) и стратегии профилактического обслуживания на основе данных. Это приведет к снижению затрат, простоев и повышению надежности.

Список использованных источников

1. Gataullin A.M. Insulators electrical strength estimation under ac applied voltage. В сборнике: Proceedings – 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2019. 2019. С. 35-39.
2. Cho, D.H.; Jung, H.K.; Chung, T.K.; Lee, C.G. Design of a Short-Time Rating Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Using a Niching Genetic Algorithm. IEEE Trans. Magn. 2000, 36, 1936–1940.
3. Duan, Y.; Toliyat, H. A Review of Condition Monitoring and Fault Diagnosis for Permanent Magnet Machines. In Proceedings of the IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, USA, 22–26 July 2012.
4. Gataullin A.M., Gubaev D.F., Khusnutdinov R.R. Automation of high-voltage electrical equipment insulators diagnostics by partial discharges method. В сборнике: Proceedings – 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021. 2021. С. 58-62.

5. Sardar, M.U.; Vaimann, T.; Kütt, L.; Kallaste, A.; Asad, B.; Akbar, S.; Kudelina, K. Inverter-Fed Motor Drive System: A Systematic Analysis of Condition Monitoring and Practical Diagnostic Techniques. *Energies* 2023, 16, 5628.
6. Gataullin A.M., Gubaev D.F., Gataullina R.V. Software and hardware system of monitoring high-voltage electric equipment based on the analysis of partial discharge characteristics. В сборнике: International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Proceedings. 2023. С. 171-176.
7. Bellini, A.; Filippetti, F.; Tassoni, C.; Capolino, G.-A. Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2008, 55, 4109–4126.
8. Gataullin A.M. Online monitoring of the porcelain insulator units state. В сборнике: 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020. 2020. С. 9271631.
9. Asad, B.; Vaimann, T.; Rassölkin, A.; Kallaste, A.; Belahcen, A. A Survey of Broken Rotor Bar Fault Diagnostic Methods of Induction Motor. *Electr. Control. Commun. Eng.* 2018, 14, 117–124.
10. Gataullin A.M. Online technology of insulators condition monitoring in smart grid power supply systems. В сборнике: 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019. 2019. С. 8934770.

MODERN METHODS OF FAULT DIAGNOSIS IN ELECTRIC MACHINES: ACHIEVEMENTS AND DIRECTIONS FOR THE FUTURE

A.R. Giniyatov

*Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia*

The article is devoted to an overview of methods for monitoring the condition and troubleshooting electrical machines. It has been shown that unforeseen equipment downtime leads to significant financial losses, which makes early detection of malfunctions critically important.

Keywords: *electric machines, condition monitoring, fault diagnosis, signal processing, artificial neural networks.*

УДК 656.07:338.47

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ И ЛОКАЛИЗАЦИИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Д.А. Горбачев¹

*Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия*

Статья посвящена обзору современных методов обнаружения и локализации повреждений силовых кабелей с использованием искусственного интеллекта. Актуальность работы обусловлена широкомасштабной интеграцией возобнов-

¹ Научный руководитель: А.М. Гатауллин, к.т.н., доцент.

ляемых источников энергии и распределённой генерации, что усложняет анализ неисправностей в электрических сетях и выявляет ограничения традиционных подходов. Рассмотрены основные причины повреждений кабелей: локальный перегрев, увлажнение изоляции и механические воздействия. Проанализированы традиционные методы (бегущие волны, анализ токов заземления, частотные преобразования) и их недостатки: сложность точного моделирования разветвлённых сетей, низкая адаптивность к изменяющейся топологии и неспособность эффективно обрабатывать нелинейные данные.

Ключевые слова: повреждение кабеля, обнаружение неисправностей, локализация неисправностей, искусственный интеллект, глубокое обучение.

Современные энергосистемы активно интегрируют новые источники энергии, такие как фотоэлектрические станции, ветрогенерация и биогаз. Китай, например, к декабрю 2024 года достиг выработки возобновляемой энергии в 3,46 трлн кВт·ч, что составляет около 86% от общего прироста потребления. Однако кабельные линии, особенно в городских распределительных сетях, проложенные в туннелях и траншеях, подвержены частичным разрядам, коротким замыканиям и перегрузкам. Такие неисправности приводят к экономическим потерям, угрозе безопасности и снижению надёжности энергоснабжения. Традиционные методы обнаружения не всегда эффективны из-за роста сложности сетей и интеграции систем распределённой генерации. В этих условиях искусственный интеллект, особенно глубокое обучение, предлагает новые возможности для автоматического извлечения признаков и обработки больших данных [1]. Надёжность кабелей снижается под воздействием трёх основных факторов. Локальный перегрев возникает при длительной перегрузке по току, превышении допустимой температуры (для изоляции из сшитого полиэтилена – 90°C по стандарту IEC 60502-1), плохом теплоотводе, ли может быть причиной возникновения и развития частичных разрядов (ЧР) [2]. Термическое старение разрушает молекулярную структуру изоляции, снижая пробивное напряжение. Увлажнение изоляции происходит из-за нарушения герметизации или механических повреждений. Влага проникает в изоляционный слой, вызывая рост водных и электрических триингов (ЧР), снижая диэлектрическую прочность до 85–94% от нормы. Состояние изоляции важно определять в режиме мониторинга [3]. Важно в режиме мониторинга отделять ЧР в кабелях от ЧР в изоляторах линий электропередачи (ЛЭП) [4], изоляции трансформаторов [5]. Механические повреждения (изгибы, растяжения, внешние воздействия) нарушают целостность защитной оболочки и изоляции, приводя к увеличению интенсивности ЧР и коротким замыканиям (КЗ). Традиционные подходы обнаружения неисправностей в кабельных линиях (КЛ) включают метод бегущей волны, анализ токов нулевой последовательности в сетях с изолированной нейтралью через контур заземления, анализ частотных характеристик, вейвлет-преобразование. Эти методы широко применяются на практике благодаря простоте реализации и низкой стоимости. Однако они имеют три ключевых ограничения. Во-первых, с ростом масштаба сетей и появлением множества ответвлений

точное моделирование становится крайне сложным. Во-вторых, интеграция систем распределенной генерации в единую энергосистему (ЕЭС) ухудшает качество электроэнергии по причине применения инверторов, с одной стороны, с другой стороны требует новых алгоритмов распознавания повреждений по токам однофазных замыканий на землю (ОЗЗ). В-третьих, интеграция возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ) в ЕЭС, требует специальной настройки уставок релейной защиты и автоматики (РЗА) [6]. Для решения этих проблем применяются алгоритмы машинного обучения. Искусственные нейронные сети (ANN) успешно используются для локализации повреждений в распределительных сетях с распределенной генерацией. Например, метод на основе многослойного персептрона (MLP) с анализом главных компонент позволяет определять место повреждения без управляющих сигналов и синхронизации времени. Метод опорных векторов (SVM) эффективен для классификации типов неисправностей. Оптимизация SVM с помощью роя частиц (PSO) повышает точность локализации, а регрессия на основе SVM (LSSVR) устойчива к шумам и изменениям параметров кабеля. Генетические алгоритмы (GA), имитирующие естественный отбор, решают задачи оптимизации, например, поиск максимума падения напряжения нулевой последовательности. GA устойчивы к изменению сопротивления и угла возникновения неисправности, а их сочетание с частотными профилями напряжения даёт погрешность локализации менее 0,1% [7].

Глубокое обучение обеспечивает ещё более высокую точность и автоматизацию. Механизмы внимания, такие как модуль сверточного блочного внимания (CBAM) в сети YOLOv5, позволяют модели фокусироваться на ключевых признаках. При обнаружении неисправностей заземления в оптических кабелях, погрешность составляет менее 1%. Свёрточные нейронные сети (CNN) извлекают иерархические признаки из сигналов. Гибрид DWT, хаотической системы Лоренца и CNN достигает точности 97,5% при классификации повреждений изоляции. Остаточные сети (ResNet) с короткими связями решают проблему затухания градиента. Метод BiGRU-ResNet-MA для трёхфазных кабелей обеспечивает 100% точность идентификации повреждённой линии. Сети DBN, построенные на ограниченных машинах Больцмана, показывают среднюю точность распознавания неисправностей 97,8%, что превосходит традиционные неглубокие сети. Для локализации повреждений применяются одномерные CNN (1D-CNN) с максимальной погрешностью менее 0,1% и временем обработки менее 0,15 с. Графовые сверточные сети (GCN) позволяют моделировать топологию сети и эффективно фиксировать пространственные зависимости, превосходя по точности случайный лес и CNN [8].

Методы ИИ обладают тремя ключевыми преимуществами. Первое – нелинейное извлечение признаков. Сигналы о повреждениях (бегущие волны, частичные разряды) имеют большую размерность и зашумлены. ИИ с помощью функций активации и многослойных преобразований эффективно разделяет сложные взаимозависимости. Второе – эффективная

обработка больших данных. ИИ использует параллельные вычисления на графическом процессоре (GPU), механизмы внимания и распределённое обучение, что позволяет анализировать огромные объёмы сетевых данных в реальном времени. Третье – адаптивное обучение и динамическая оптимизация. ИИ не требует фиксированных порогов, а GCN и CNN могут подстраиваться под изменяющуюся топологию сети. Однако, методы ИИ имеют и серьёзные ограничения. Высокая зависимость от данных является главной проблемой: реальных выборок неисправностей мало, классы несбалансированы, а лабораторные данные отличаются от реальных по уровню шума и сопротивлению заземления. Требуются совместные усилия операторов сетей, физическое моделирование и обмен данными между организациями. Вторая проблема – плохая адаптируемость к динамической среде при интеграции DG. Ветровые и солнечные генераторы нестабильны, зарядные устройства электромобилей вносят искажения тока (THD, дисбаланс фаз, мерцание напряжения). Это усложняет извлечение признаков неисправностей. Решением может стать дальнейшая интеграция ИИ с адаптивными системами защиты и передовой коммуникационной инфраструктурой [9].

Современные методы обнаружения и локализации неисправностей кабелей необходимо развивать. Во-первых, требуются модели расчёта возможных неисправностей для активных распределительных сетей с учётом реальных условий для присоединений и топологии сети. Во-вторых, необходимо расширять применение передовых моделей ИИ (свёрточные сети, механизмы внимания, GCN), одновременно решая проблему недостатка данных через синтетические наборы данных, отражающие реальные условия, включая ЧР в интеллектуальных системах энергоснабжения [10]. В-третьих, следует оптимизировать размещение измерительных устройств (регистраторов ЧР, детекторов бегущей волны) на основе топологии сети, чтобы снизить затраты при сохранении эффективности диагностики. Только комплексный подход, сочетающий ИИ, качественные данные и экономичное измерение, позволит обеспечить надёжную работу интеллектуальных сетей будущего.

Список использованных источников

1. Барановский А.М., Мусиенко А. С., Шулика Н. Р. Алгоритм поиска дефектов типа «короткое замыкание» в электрических цепях кабельной сети сложной автоматизированной системы // Труды МАИ. – 2023. – № 133. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/algoritm-poiska-defektov-tipa-korotkoe-zamykanie-v-elektricheskikh-tsepyah-kabelnoy-seti-slozhnoy-avtomatizirovannoy-sistemy> (дата обращения: 05.05.2026).
2. Gataullin A.M. High voltage electrical insulators diagnostics by partial discharges characteristics // В сборнике: Proceedings – 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2020. – 2020. – С. 426-43.
3. Gataullin A.M. Insulators electrical strength estimation under ac applied voltage // В сборнике: Proceedings – 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2019. – 2019. – С. 35-39.

4. Gataullin A.M. Development of method for high-voltage electrical equipment insulators monitoring in uhf range of electromagnetic radiation // В сборнике: Proceedings – 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020. – 2020. – С. 9112023.
5. Gataullin A.M. Online monitoring of the porcelain insulator units state // В сборнике: 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020. м2020. – С. 9271631.
6. Наркевич А.Н., Виноградов К.А., Параскевопуло К.М., Мамедов Т.Х. Интеллектуальные методы анализа данных в биомедицинских исследованиях: сверточные нейронные сети // Экология человека. – 2021. – №5.
7. Скрипачев В.О., Гуйда М.В., Гуйда Н.В., Жуков А.О. Особенности работы сверточных нейронных сетей // International Journal of Open Information Technologies. – 2022. – №12.
8. Смородинов А.Д., Гавриленко Т.В., Рассадин А.А. Исследование применимости сверточных нейронных сетей для задачи идентификации типа зависимости в наборах данных // Успехи кибернетики. – 2023. – Т. 4, № 3. – С. 47-54. – DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-3-05.
9. Галкин В.А., Гавриленко Т.В., Смородинов А.Д. Некоторые аспекты аппроксимации и интерполяции функций искусственными нейронными сетями. Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. – 2022. – № 38(1). – С. 54–73. – DOI: 10.26117/2079-6641-2022-38-1-54-73. EDN: JTZQQZ.
10. Gataullin A.M. Online technology of insulators condition monitoring in smart grid power supply systems // В сборнике: 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019. – 2019. – С. 8934770.

ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR DETECTING AND LOCALIZING SHORT CIRCUITS OF CABLE LINES

D.A. Gorbachev¹

*Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia*

The article is devoted to an overview of modern methods for detecting and localizing damage to power cables using artificial intelligence. The relevance of the work is due to the large-scale integration of renewable energy sources and distributed generation, which complicates the analysis of faults in electrical networks and reveals the limitations of traditional approaches. The main causes of cable damage are considered: local overheating, humidification of insulation and mechanical effects. The traditional methods (traveling waves, ground current analysis, frequency transformations) and their disadvantages are analyzed: the complexity of accurate modeling of extensive networks, low adaptability to changing topology, and the inability to efficiently process nonlinear data.

Keywords: *cable damage, fault detection, fault localization, artificial intelligence, deep learning.*

¹ Scientific supervisor: A.M. Gataullin, Ph.D., Associate Professor.

ИНТЕГРАЦИЯ МОБИЛЬНЫХ ПОДСТАНЦИЙ В КОНЦЕПЦИЮ ACTIVE DISTRIBUTION NETWORK (ADN) С ДИНАМИЧЕСКОЙ АДАПТАЦИЕЙ ТОЧКИ ПРИСОЕДИНЕНИЯ

Р.З. Давлетбаев¹

*Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия*

Статья посвящена интеграции мобильных подстанций (МПС) в концепцию Active Distribution Network (ADN) – активных распределительных сетей с динамической адаптацией конфигурации. Рассмотрены принципы ADN, предполагающие активное управление потоками мощности, присоединением распределённой генерации и изменением топологии сети в реальном времени.

Ключевые слова: активная распределительная сеть, Active Distribution Network, ADN, мобильная подстанция, динамическая адаптация.

Традиционные распределительные электрические сети проектировались как пассивные системы, в которых мощность движется односторонне – от источников высокого напряжения к потребителям через фиксированную топологию. Однако рост распределённой генерации, появление накопителей энергии и активного потребителя (просьюмера) привели к необходимости пересмотра этой парадигмы. Концепция Active Distribution Network (ADN) предполагает превращение распределительных сетей в активно управляемые системы, способные изменять свою конфигурацию, перераспределять потоки мощности, регулировать напряжение и частоту, а также интегрировать разнородные источники в реальном времени. В этой парадигме мобильные подстанции, традиционно воспринимаемые как аварийный или временный инструмент, приобретают новую роль. Они могут стать мобильными узлами ADN, способными динамически менять точку своего присоединения к сети в зависимости от текущих режимных параметров, нагрузок и возникновения аварийных ситуаций [1].

Динамическая адаптация точки присоединения означает, что одна и та же мобильная подстанция в течение суток, недели или сезона может быть подключена к разным узлам распределительной сети. Например, утром МПС работает в одном районе, питая промышленную зону, а вечером перемещается в жилой квартал, где наблюдается пик нагрузки. Или же при выходе из строя стационарной подстанции МПС автоматически подключается к соседнему фидеру, обеспечивая резервирование. Реализация такой динамики требует трёх ключевых технологических компонентов. Во-первых, необходимы стандартизированные быстросборные высоковольтные разъёмы типа Plug & Play, позволяющие подключать и отключать МПС за минуты без специального инструмента. Во-вторых, требуется ав-

¹ Научный руководитель: О.В. Наумов, канд.тех.н, доцент.

томатизированная система фазировки и синхронизации, которая при каждом новом присоединении измеряет параметры сети в точке подключения и автоматически настраивает алгоритмы включения, в том числе с использованием технологии Point-on-Wave для безударной коммутации. В-третьих, и это наиболее важно для ADN, необходима интеграция МПС в цифровую систему управления распределительной сетью через протоколы IEC 61850 или аналогичные. Мобильная подстанция должна не просто получать команду на подключение, но и сообщать диспетчерскому центру свои технические характеристики, текущую загрузку, запас мощности, а также получать данные о состоянии сети в различных узлах для принятия решения об оптимальной точке присоединения [2].

Алгоритмическая задача выбора оптимальной точки присоединения МПС в рамках ADN представляет собой многофакторную оптимизацию. Критерии могут включать минимизацию технических потерь электроэнергии при передаче, что особенно актуально при питании удалённых районов. Другой критерий – разгрузка перегруженных линий и трансформаторов: если датчики в сети фиксируют превышение допустимого тока на каком-либо фидере, МПС может быть подключена параллельно или последовательно для шунтирования избыточной мощности. Важным критерием является обеспечение качества электроэнергии: в точках присоединения с недопустимыми отклонениями напряжения или высокими гармониками МПС может работать как активный фильтр или статический компенсатор, если её конструкция это позволяет. Наконец, в сетях с высокой долей возобновляемой энергетики (солнечные и ветровые электростанции) мобильные подстанции могут мигрировать вслед за генерацией – например, в солнечный день подключаться ближе к солнечным панелям для сбора избыточной мощности и её трансформации на более высокий класс напряжения [3]. Диспетчерский центр ADN решает эту оптимизационную задачу в реальном времени, используя прогнозы нагрузки и генерации, данные SCADA и модели потокораспределения. Результатом может быть как команда на перемещение МПС, так и, в более простых случаях, дистанционное переключение разъединителей, изменяющее топологию сети таким образом, что точка присоединения МПС меняется без физического перемещения самой подстанции (так называемая виртуальная мобильность).

Рассмотрим несколько сценариев использования мобильных подстанций в ADN. Первый сценарий – сезонная адаптация. В летний период в курортных зонах нагрузка возрастает в 2–3 раза, а в промышленных районах снижается из-за отпусков. Две-три мобильные подстанции могут мигрировать между этими зонами, подключаясь то к одной, то к другой группе потребителей, что позволяет отказаться от строительства стационарных ПС, загруженных лишь несколько месяцев в году. Вторым сценарий – автоматическое восстановление после аварий. При повреждении кабельной линии или трансформатора система ADN локализует повреждённый участок, переключает питание по резервным схемам и одновременно направляет ближайшую свободную МПС к месту отключения. Время восстановления со-

кращается с часов до 15–20 минут. Третий сценарий – поддержка напряжения в сети с распределённой генерацией. Если в некотором узле напряжение превышает допустимый уровень из-за избыточной генерации от солнечных панелей, МПС может быть подключена в этом узле и перекачать часть мощности в другой район, либо использовать накопители (если они есть в составе МПС) для сглаживания пиков [4].

Техническая реализация динамической адаптации точки присоединения требует модернизации самих мобильных подстанций. Помимо уже упомянутых быстросборных разъёмов и автоматизированных систем синхронизации, МПС должна быть оснащена двухсторонним цифровым каналом связи с центром управления ADN. Желательно также наличие встроенных измерительных систем (PMU – синхронизированных векторных измерений), которые позволяют оценивать параметры сети в реальном времени с меткой GPS. Кроме этого, силовой трансформатор МПС должен иметь возможность работы в режиме регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) с дистанционным управлением, чтобы адаптироваться к изменяющимся условиям в разных точках присоединения. Немаловажным является и вопрос логистики: перемещение МПС должно быть максимально быстрым, что требует наличия специально оборудованных площадок-узлов присоединения с предустановленными кабельными вводами и заземляющими контурами, расположенных в ключевых точках распределительной сети [5].

Таким образом, интеграция мобильных подстанций в концепцию Active Distribution Network с динамической адаптацией точки присоединения открывает новые возможности для повышения гибкости, надёжности и экономичности распределительных сетей. Вместо статичных резервов мощности, простаивающих большую часть времени, сеть получает мобильные ресурсы, которые могут быть направлены в любую точку по требованию. Это особенно ценно в условиях децентрализации энергетики и роста нестабильной возобновляемой генерации. Дальнейшее развитие направления связано с созданием полностью автономных мобильных подстанций-роботов, способных самостоятельно оценивать режим сети, выбирать оптимальное место подключения, перемещаться к нему и выполнять коммутации без участия оператора, а также с внедрением алгоритмов машинного обучения для прогнозирования необходимости перемещения МПС на основе исторических данных о нагрузках и авариях.

Список использованных источников

1. Колосок И.Н., Коркина Е.С. Анализ кибербезопасности цифровой подстанции с позиций киберфизической системы // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2019. – №3 (15). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-kiberbezopasnosti-tsifrovoy-podstantsii-s-pozitsiy-kiberfizicheskoy-sistemy> (дата обращения: 12.05.2026).
2. Куликов А.Л., Осокин В.Л., Папков Б.В. Проблемы и особенности распределённой электроэнергетики // Вестник НГИЭИ. – 2018. – №11 (90). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-i-osobennosti-raspredelyonnoy-elektroenergetiki> (дата обращения: 14.05.2026).

3. Мобильные трансформаторные подстанции: гибкость и быстрота развертывания. – [Электронный ресурс], – URL: <https://www.dissercat.com/content/tsifrovaya-sistema-avtomaticheskogo-ogranicheniya-povysheniya-napryazheniya-setei-110-750-kv> (дата обращения 12.05.2026).

4. Сушков В.В., Ревякин Е. Е. Система синхронизации фазовых углов напряжений генераторов при их включении на совместную работу // ОНВ. – 2022. – №1 (181). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-sinhronizatsii-fazovyh-uglov-napryazheniy-generatorov-pri-ih-vklyuchenii-na-sovmestnuyu-rabotu> (дата обращения: 14.05.2026).

5. Интеллектуальная энергетика: сборник трудов II Всероссийской научно-практической конференции (Томск, 12–14 ноября 2024 г.) / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2024. – 252 с.

INTEGRATION OF MOBILE SUBSTATIONS INTO THE ACTIVE DISTRIBUTION NETWORK (ADN) CONCEPT WITH DYNAMIC POINT OF CONNECTION ADAPTATION

R.Z. Davletbaev¹

*Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia*

The article is devoted to the integration of mobile substations (MPS) into the Active Distribution Network (ADN) concept – active distribution networks with dynamic configuration adaptation. The principles of ADN are considered, which involve active management of power flows, connection of distributed generation and network topology changes in real time.

Keywords: active distribution Network, Active Distribution Network, ADN, mobile substation, dynamic adaptation.

УДК 621.311.4:621.316.1

ОСОБЕННОСТИ ПРИСОЕДИНЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Р.З. Давлетбаев²

*Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия*

В статье рассмотрены технологические и эксплуатационные особенности присоединения мобильных подстанций (МПС) к электрическим сетям 6–220 кВ. Проанализированы перспективные направления развития техники подключения, включая алгоритмы синхронизации Point-on-Wave и предиктивную аналитику.

Ключевые слова: мобильная подстанция, присоединение к сети, синхронизация, бросок тока намагничивания, высоковольтный разъем.

¹ Scientific supervisor: O.V. Naumov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.

² Научный руководитель: О.В. Наумов, канд.тех.н, доцент.

Мобильные подстанции (МПС) всё шире используются для оперативного восстановления электроснабжения при авариях, плановой замены стационарных трансформаторов, временного питания строящихся или реконструируемых объектов, а также в условиях сезонных перегрузок. В отличие от стационарных ПС, подключение которых выполняется по проекту с монтажом открытых распределительных устройств (ОРУ), МПС должна быть присоединена к сети в минимальные сроки – от 30 минут до нескольких часов – с соблюдением всех требований безопасности и надёжности. Именно эта специфика порождает комплекс технических проблем: обеспечение точной фазировки, ограничение переходных токов, совместимость систем РЗА, а также необходимость выравнивания потенциалов при временном заземлении [1].

Традиционное присоединение МПС включает отключение линии или секции шин, подключение кабельных вводов, проверку фазировки и последующее включение. Однако развитие распределённой генерации и концепции активных сетей (ADN) требует перехода к технологиям «горячего» подключения без отключения потребителей. Одним из перспективных направлений является применение алгоритмов синхронизации Point-on-Wave (PoW) – включение выключателя в строго заданный момент времени, когда мгновенное напряжение сети и трансформатора МПС близки к нулю или равны по амплитуде и фазе. Это позволяет снизить броски тока намагничивания в 3–5 раз и исключить ложные срабатывания дифференциальных защит.

Другое направление – предиктивная аналитика на основе ретроспективных данных о переходных процессах. Перед присоединением система оценивает параметры сети (токи КЗ, остаточное намагничивание сердечника силового трансформатора) и рекомендует оптимальный момент или последовательность включения фаз. Также активно развиваются распределённые системы РЗА (IEC 61850 Goose), позволяющие временно изменять уставки на время работы МПС и автоматически восстанавливать их после отключения. В долгосрочной перспективе возможно использование мобильных подстанций как элементов активной дистрибуторской сети, где точка присоединения выбирается динамически, в зависимости от загрузки смежных фидеров [2].

Быстрота присоединения МПС невозможна без специализированного оборудования. Ключевым элементом стали высоковольтные быстросборные кабельные вводы (Plug & Play) на номинальные напряжения 6–110 кВ. Например, разъёмы типа Nexans Euromold (до 36 кВ) или Trench (110 кВ) позволяют механически соединить кабель МПС с линейным разъёмом за 1–2 минуты без заливки мастики и специального инструмента. Современные модификации снабжены встроенными ёмкостными делителями напряжения для автоматической фазировки.

Для дистанционного присоединения к воздушным линиям применяются автоматические контакторы с моторным приводом и гибкими изолированными токопроводами. Они монтируются на опоре ВЛ и управляются с пульта или по радиоканалу. Дополнительно используются мобильные

фазировочные устройства с синхронизацией по GPS/ГЛОНАСС – они сравнивают векторы напряжений на двух концах разомкнутого участка с точностью до 1° и отображают допустимость включения. В качестве инструмента контроля в момент подключения всё чаще применяются портативные регистраторы параметров переходных процессов (например, Megger PA-9), фиксирующие броски тока намагничивания и напряжения на обмотках трансформатора [3].

Оптимизация режимов присоединения МПС сегодня немыслима без компьютерного моделирования. На этапе проектирования временной схемы выполняется расчёт электромагнитных переходных процессов в пакетах EMTP-АТР или PSCAD. Моделируется включение трансформатора МПС на реальную сеть с учётом: насыщения сердечника, остаточного потока, ёмкостной связи между кабелями и феррорезонанса в цепях трансформаторов напряжения. Пример: при подключении МПС 110/10 кВ через кабель длиной 300 м на шины, где уже работает другой трансформатор, возможно возникновение феррорезонанса с перенапряжениями до $2,5 U_{\text{ф}}$. Моделирование позволяет подобрать демпфирующие цепи или изменить алгоритм включения фаз.

Более продвинутый подход – разработка цифровых двойников узла присоединения. Цифровой двойник содержит геометрические параметры МПС, динамические характеристики привода выключателя, фактические кривые намагничивания трансформатора. Перед реальным присоединением система проводит серию виртуальных включений, минимизируя риски. Также применяется трёхмерное ВМ-моделирование для проверки габаритной совместимости МПС с существующими порталами ОРУ, кабельными каналами и системами заземления [4].

Наконец, активно внедряются нейросетевые модели для прогнозирования бросков тока намагничивания по предшествующим осциллограммам. После 5–10 обучающих включений нейросеть способна с ошибкой менее 8% предсказать амплитуду броска и подобрать оптимальную фазу включения.

Несмотря на цифровые помощники, присоединение МПС остаётся сложной электротехнической задачей. Первая проблема – фазировка. В отличие от стационарной ПС, где порядок чередования фаз жёстко закреплён, мобильный ввод может быть подключен к любой комбинации фаз линии. Обязательна процедура контроля совпадения чередования и равенства углов (допуск не более 10° на напряжениях 110 кВ). Второй аспект – броски тока намагничивания силового трансформатора МПС. Их амплитуда может достигать 8–12 $I_{\text{ном}}$ и ложно срабатывать токовая отсечка. Снижение достигается либо включением через гасящий резистор, либо пофазным управлением (коммутация каждой фазы в свой оптимальный момент).

Особые требования предъявляются к заземлению. Мобильная ПС имеет собственный контур заземления (обычно модульный из стальных стержней), который должен быть соединён с контуром опоры ВЛ или подстанции. В стеснённых городских условиях применяют уравнильные проводники сечением не менее 50 мм² по меди. При присоединении «на

ходу» (под рабочим напряжением) обязательно использование переносных заземлителей и штанг для наложения заземления с двух сторон – иначе высокое напряжение шага при повреждении ввода может достичь 10–15 кВ.

Наконец, необходимо обеспечить селективность РЗА. МПС вносит дополнительную ступень защиты, которая может быть не согласована по току и времени с вышестоящими выключателями. Типовое решение – ввод в цепь управления мобильного вводного автомата защит с адаптивными уставками, переключаемыми вручную или по радиоканалу от диспетчера [5].

Присоединение мобильных подстанций – это комплексная проблема на стыке переходных процессов, высоковольтного оборудования, цифрового моделирования и эксплуатационных практик. Перспективные направления (РоW-синхронизация, предиктивная аналитика) совместно с современным оборудованием (Plug & Play разъёмы, GPS-фазировщики) и компьютерным моделированием (PSCAD, цифровые двойники) позволяют сократить время подключения до 15–20 минут и гарантировать безаварийный режим. Вместе с тем, фундаментальные электротехнические ограничения – броски намагничивания, феррорезонанс, требования заземления – требуют строгого соблюдения режимов включения.

Список использованных источников

1. Колосок И. Н., Коркина Е. С. Анализ кибербезопасности цифровой подстанции с позиций киберфизической системы // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2019. – №3 (15). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-kiberbezopasnosti-tsifrovoy-podstantsii-s-pozitsiy-kiberfizicheskoy-sistemy> (дата обращения: 12.05.2026).
2. Мобильные модульные подстанции обеспечивают надёжность электрообеспечения олимпийских объектов. – [Электронный ресурс], – URL: <https://eepir.ru/article/mobilnye-modulnye-podstancii-obes/> (дата обращения 12.05.2026).
3. Мобильные трансформаторные подстанции: гибкость и быстрота развёртывания. – [Электронный ресурс], – URL: <https://zavod-96.ru/info/articles/mobilnye-transformatornye-podstancii-gibkost-i-bystrota-razvertyvaniia/> (дата обращения 12.05.2026).
4. Мобильные модульные подстанции компании «СПЕЦЭНЕРГО». – [Электронный ресурс], – URL: <https://www.eprussia.ru/com/articles/729738.htm> (дата обращения 12.05.2026).
5. Ледин С. Интеллектуальные сети Smart Grid – будущее российской энергетики // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2010. – №10. – С. 39-43.

FEATURES OF CONNECTION OF MOBILE SUBSTATIONS

R.Z. Davletbaev¹

*Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia*

The article discusses the technological and operational features of connecting mobile substations (MPS) to 6-220 kV electric grids. Promising directions for the develop-

¹ Scientific supervisor: O.V. Naumov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.

ment of connectivity technology, including Point-on-Wave synchronization algorithms and predictive analytics, are analyzed.

Keywords: mobile substation, connection to the grid, synchronization, surge of magnetization current, high-voltage connector.

УДК 621.316.57:621.311.4

СИНХРОНИЗАЦИЯ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ СИНФАЗНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ (POINT-ON-WAVE) ДЛЯ БЕЗУДАРНОГО ПОДКЛЮЧЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Р.З. Давлетбаев¹

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

Статья посвящена применению технологии синфазного включения Point-on-Wave (PoW) для обеспечения безударного подключения мобильных подстанций (МПС) к электрическим сетям. Рассмотрены физические причины бросков тока намагничивания при включении силовых трансформаторов и показано, как управляемая коммутация в заданный момент кривой напряжения позволяет минимизировать эти броски.

Ключевые слова: управляемая коммутация, Point-on-Wave, мобильная подстанция, безударное подключение, бросок тока намагничивания.

Мобильные подстанции стали неотъемлемым инструментом современной электроэнергетики, обеспечивая оперативное восстановление электроснабжения после аварий, временное питание строящихся объектов и замену стационарного оборудования без длительного отключения потребителей. Однако процесс подключения МПС к сети сопряжён с серьёзной технической проблемой: включение силового трансформатора на полное напряжение почти всегда сопровождается броском тока намагничивания, который может в 8–12 раз превышать номинальный ток трансформатора. Эти броски вызывают ложные срабатывания токовой отсечки и дифференциальных защит, создают динамические удары по обмоткам и магнитопроводу, сокращая ресурс оборудования, а также провоцируют искажения напряжения в питающей сети, что может привести к отключению смежных потребителей. Традиционные методы борьбы с бросками – включение через гасящий резистор, последовательное включение фаз или применение предвключённых контактов – либо удлиняют время подключения, либо требуют дополнительного громоздкого оборудования, что противоречит самой идее мобильности. Именно поэтому технология синфазного включения Point-on-Wave рассматривается сегодня как наиболее перспективное решение для безударного подключения мобильных подстанций [1].

¹ Научный руководитель: О.В. Наумов, канд.тех.н, доцент.

Физическая сущность броска тока намагничивания заключается в насыщении магнитной системы трансформатора. При включении на напряжение потокосцепление в сердечнике вынужденно устанавливается с постоянной составляющей, потому что мгновенное значение напряжения в момент коммутации обычно не равно нулю. Если включение происходит в момент, близкий к вершине синусоиды, то принуждённый поток достигает максимальных значений, и при наличии остаточного потока от предыдущего отключения сердечник мгновенно входит в насыщение. Ток намагничивания при этом возрастает лавинообразно, так как индуктивность обмотки при насыщении падает на два-три порядка. Технология Point-on-Wave позволяет избежать этого, управляя моментом замыкания контактов. Идеальный случай – коммутация в момент перехода напряжения через ноль, когда принуждённый поток также проходит через ноль. Однако на практике из-за остаточного намагничивания сердечника оптимальная точка включения смещается. Современные PoW-контроллеры измеряют остаточный поток при предыдущем отключении и вычисляют необходимый угол опережения, чтобы после замыкания контактов результирующий поток не превышал насыщения. Для трёхфазных трансформаторов задача усложняется, поскольку оптимальные моменты для разных фаз не совпадают из-за сдвига на 120° , что требует либо индивидуального управления каждой фазой с помощью трёх однополюсных выключателей, либо использования специальных алгоритмов коммутации [2].

Применение PoW для мобильных подстанций имеет важные особенности, отличающие его от стационарного использования. В стационарной ПС параметры сети, характеристики выключателя и трансформатора известны заранее, и настройки контроллера могут быть выполнены один раз на весь период эксплуатации. Мобильная же подстанция после каждого перемещения подключается к новой точке сети с неизвестными параметрами: длиной и типом линии, составом нагрузок, величиной токов короткого замыкания, а также с неизвестной частотой и стабильностью напряжения. Поэтому PoW-контроллер МПС должен выполнять процедуру самокалибровки перед каждым подключением. Эта процедура включает измерение частоты сети, определение амплитуды напряжения на вводе высокого напряжения, а также оценку угла сдвига между напряжением на стороне МПС и напряжением в точке присоединения, если выключатель находится на удалённом конце линии. Дополнительно требуется высокоточная синхронизация времени, поскольку момент замыкания контактов должен быть определён с погрешностью не более 50 микросекунд. Для этого используется приёмники GPS/ГЛОНАСС, которые встроены в современные PoW-контроллеры и обеспечивают привязку к мировому координированному времени с точностью до 30 нс [3].

Ещё одна проблема, специфичная для МПС, – неопределённость остаточного намагничивания трансформатора. Трансформатор мобильной

подстанции мог быть отключен несколько часов, дней или даже недель назад. За это время остаточный поток частично затухает под действием вибраций и тепловых флуктуаций, но полностью никогда не исчезает. Эксперименты показывают, что даже спустя сутки остаточный поток сохраняется на уровне 30–70% от максимального. Для безударного подключения критически важно знать точное значение остаточного потока перед включением.

Один из подходов – предварительное намагничивание: перед подачей сетевого напряжения на обмотку низшего напряжения трансформатора кратковременно (в течение 0,5–1 секунды) подаётся напряжение от вспомогательного инвертора, который имеется в составе МПС для питания собственных нужд. Это устанавливает заданный поток и устраняет неопределённость. Альтернативный подход – адаптивный алгоритм, при котором первое включение выполняется в расчётную оптимальную точку, по осциллограмме броска тока оценивается фактический остаточный поток, и после снятия команды выполняется повторное включение уже с корректировкой. Первый способ предпочтительнее для МПС, так как позволяет выполнить безударное подключение с первой попытки [4].

Эффективность технологии PoW для мобильных подстанций подтверждается результатами компьютерного моделирования и натурными испытаниями. Моделирование в пакете PSCAD/EMTDC для типовой МПС 110/10 кВ мощностью 25 МВА показало, что при несинхронизированном включении в момент, соответствующий вершине напряжения, бросок тока намагничивания достигал 8,3 номинального тока, а перенапряжение на соседней подстанции – 1,6 фазного напряжения.

При использовании PoW-алгоритма с предварительным намагничиванием и индивидуальной коммутацией фаз бросок тока снизился до 1,2 номинального тока, а перенапряжение не превысило 1,1. Полевые испытания, проведённые на подстанциях 110 кВ в период 2022–2024 годов, зафиксировали снижение доли ложных срабатываний токовой отсечки с 70% до менее 5% от общего числа подключений МПС. Анализ вибрации обмоток трансформатора также подтвердил, что исключение механических ударов при бросках увеличивает расчётный ресурс трансформатора на 30–40% [5].

Внедрение технологии Point-on-Wave для безударного подключения мобильных подстанций требует соблюдения ряда условий. Необходим выключатель с независимыми фазными приводами (трёхполюсный с общим приводом не позволяет оптимизировать коммутацию каждой фазы). Требуется PoW-контроллер, измеряющий напряжения, оценивающий остаточный поток и формирующий импульсы с микросекундной точностью.

Если коммутацию выполняет линейный выключатель на опоре, нужен канал связи с задержкой не более 10 мкс (оптоволокно или радио с GPS-синхронизацией). Также обязателен резервный режим на случай отказа

контроллера – например, включение через гасящий резистор. Таким образом, синфазное включение становится ключевым элементом современной МПС, обеспечивающим быстрое, надёжное и безударное подключение к любой сети.

Список использованных источников

1. Колосок И.Н., Коркина Е.С. Анализ кибербезопасности цифровой подстанции с позиций киберфизической системы // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2019. – №3 (15). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-kiberbezopasnosti-tsifrovoy-podstantsii-s-pozitsiy-kiberfizicheskoy-sistemy> (дата обращения: 12.05.2026).
2. Цифровая система автоматического ограничения повышения напряжения сетей 110-750 КВ. – [Электронный ресурс], – URL: <https://eepir.ru/article/mobilnye-modulnye-podstancii-obes/> (дата обращения 12.05.2026).
3. Мобильные трансформаторные подстанции: гибкость и быстрота развёртывания. – [Электронный ресурс], – URL: <https://www.dissercat.com/content/tsifrovaya-sistema-avtomaticheskogo-ogranicheniya-povysheniya-napryazheniya-setei-110-750-kv> (дата обращения 12.05.2026).
4. Сушков В.В., Ревякин Е. Е. Система синхронизации фазовых углов напряжений генераторов при их включении на совместную работу // ОНВ. – 2022. – №1 (181). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-sinhronizatsii-fazovyh-uglov-napryazheniy-generatorov-pri-ih-vklyuchenii-na-sovmestnuyu-rabotu> (дата обращения: 14.05.2026).
5. Интеллектуальная энергетика: сборник трудов II Всероссийской научно-практической конференции (Томск, 12–14 ноября 2024 г.) / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2024. – 252 с.

SYNCHRONIZATION BASED ON COMMON-MODE SWITCHING TECHNOLOGIES (POINT-ON-WAVE) FOR SHOCK-FREE CONNECTION OF MOBILE SUBSTATIONS

R.Z. Davletbaev¹

*Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia*

The article is devoted to the application of Point-on-Wave (PoW) common-mode switching technology to ensure shock-free connection of mobile substations (MPS) to electric networks. The physical causes of magnetization current surges when power transformers are switched on are considered and it is shown how controlled switching at a given moment of the voltage curve makes it possible to minimize these surges.

Keywords: *controlled switching, Point-on-Wave, mobile substation, shockless connection, surge of magnetization current.*

¹ Scientific supervisor: O.V. Naumov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Е.Е. Дробышева, Н.А. Зенков, А.А. Кузьмина, Л.А. Сазанова

*Уральский государственный экономический университет,
г. Екатеринбург, Россия*

В рамках данной работы обозначена проблема отсутствия оптимального программного решения для трехмерной реконструкции объектов, сбалансированного по цене и качеству, чьим основным инструментом служит фотограмметрия. Перечислены классические принципы фотограмметрии, основанные на законах оптики, геометрии и других разделов физики и математики, а также возникающие при их использовании проблемы. Обоснована необходимость привлечения нейросетевых алгоритмов при создании программного обеспечения, решающего задачи компьютерного зрения, чье совместное применение с классическими обещает получение оптимального результата.

Ключевые слова: компьютерное зрение, фотограмметрия, 3D-реконструкция, искусственный интеллект, нейросети.

В настоящее время различных сферах деятельности растет потребность в быстром и точном переносе физических объектов в цифровую среду, что обеспечивается за счет алгоритмов 3D-реконструкции, реализующих возможности компьютерного зрения. Процесс трехмерной реконструкции из изображений [1] представляет собой получение формы и облика реальных объектов и восстановление информации об их пространственных характеристиках путем анализа визуальных данных с разных ракурсов. Он сопряжен с поиском компромисса между скоростью, точностью, полнотой используемой модели и устойчивостью к проблемным сценариям, таким, как слабая текстура, повторяющиеся паттерны, неидеальные условия съемки и т.п. Оптимизация этого компромисса под конкретную задачу – ключевая инженерная проблема.

На российском рынке программных продуктов, реализующих соответствующие возможности, в настоящий момент сложилась достаточно сложная ситуация. Существует сильная зависимость от иностранного ПО, усиленная санкционными рисками, и при этом отсутствует сбалансированный вариант между сложными и дорогими профессиональными инструментами и доступными, но менее точными решениями. Лучшим среди программных лидеров 3D-реконструкции российского происхождения является профессиональное фотограмметрическое решение Agisoft Metashape, чья полнофункциональная версия стоит, однако, достаточно дорого. По этой причине задача разработки нового ПО и совершенствования методов, обеспечивающих необходимую точность для 3D-реконструкции, не теряет своей актуальности.

Процесс 3D-реконструкции объектов реализуется с помощью алгоритмов, которые автоматизируют классические принципы фотограмметрии

для извлечения пространственной информации из последовательностей изображений. Под фотограмметрией [2] здесь понимается создание точных 3D-моделей реальных объектов на основе множества их фотографий, сделанных с разных сторон. Используя готовые изображения, требуется восстановить информацию, имеющую физический смысл, в связи с чем необходимо применение законов распространения излучения и формирования изображений оптическими системами. При этом методы фотограмметрии выступают математическим фундаментом для решения задачи 3D-реконструкции, позволяя преобразовывать двумерные визуальные данные в метрически точные трехмерные модели. Специальная программа анализирует снимки, находит общие точки и «сшивает» их в цифровую объемную копию, выдавая в результате без использования сканера. Именно слияние современных технологий компьютерного зрения и основ фотограмметрии стало характерной чертой современных технологий 3D-реконструкции. Алгоритмы компьютерного зрения обеспечивают высокую степень автоматизации и робастность обработки наборов снимков, а классические фотограмметрические принципы (см. таблицу1) гарантируют геометрическую согласованность результатов.

Таблица 1 – Классические принципы фотограмметрии

Принцип	Особенности и условия применения
Центральное проектирование	Каждый снимок рассматривается как центральная проекция объекта на плоскость сенсора.
Стереоскопический эффект	Для получения объема необходимо не менее двух снимков объекта, сделанных из разных точек (базис фотографирования); чем больше разница в положении точки на двух кадрах, тем ближе объект к камере.
Условие коллинеарности	Решается уравнение, связывающее три точки прямой: центр проекции, точку на снимке и точку на реальном объекте в пространстве.
Обратная засечка (Resection)	Если известны координаты нескольких точек на земле (опорные точки) и на снимке, можно вычислить, где находился фотоаппарат в момент съемки. Принцип используется для определения положения камеры в пространстве.
Прямая засечка (Intersection)	Зная положение двух камер, можно направить из них лучи через общие точки на фото, и точка их пересечения в пространстве будет искомым 3D-координатой объекта.
Эпиполярная геометрия	Если известно положение двух камер, то точку со второго кадра не нужно искать по всему первому, она гарантированно лежит на эпиполярной линии.
Внутреннее и внешнее ориентирование	Известны параметры камеры (фокусное расстояние, дисторсия линзы), а также координаты (x, y, z) и углы наклона камеры в пространстве.

Перечисленные выше методы, основанные на геометрии и сопоставлении пикселей, при автоматизации приводят к ряду трудностей. К последним можно отнести проблему распознавания однородных текстур, «шумы» при обнаружении прозрачности и бликов, самозатенение при изображении сложных и тонких объектов и большие вычислительные затраты. Поэтому применение нейросетей и иных инструментов искусст-

венного интеллекта (далее – ИИ) в дополнение к классическим принципам сейчас весьма актуально. Алгоритмы ИИ позволяют перевести математические принципы в плоскость вероятностного прогнозирования и непрерывного представления пространства за счет следующих ключевых возможностей:

- Нейропоиск признаков: классические алгоритмы ищут углы и края для сопоставления снимков, сети находят связи между кадрами даже при резком изменении освещения или текстуры, где обычная математика ошибается.

- Высокоточные измерения и расчет прохождения лучей через обученную модель как замена классической триангуляции.

- Автоматизация восстановления структуры по движению: нейросетевые модели одновременно оценивают положение камеры, генерируют новые ракурсы и прогнозируют глубину в рамках одного пайплайна, корректируя искажения.

Разработка нейросетевых технологий, используемых в фотограмметрии и 3D-реконструкции в 2025–2026 гг. идет по пути объединения точности математических методов с гибкостью генеративного ИИ. Основным трендом становится переход от простых моделей объектов к полноценным цифровым двойникам, доступным для редактирования в реальном времени. Формируется генеративная фотограмметрия, позволяющая восстанавливать недостающие данные и создавать пространственно-согласованные 3D-сцены. Ее методы уже широко применяются для реставрации цифровых копий разрушенных или труднодоступных объектов, в игровой индустрии и электронной коммерции (для создания 3D-моделей товаров, выставляемых на маркетплейсах).

Развитие генеративной фотограмметрии движется в сторону упрощения процесса для пользователя и одновременно – усложнения внутренних алгоритмов. Согласно прогнозам разработчиков [3], наиболее актуальными станут достижения в следующих направлениях: усовершенствование возможности реконструкции по одному кадру, переход к динамическим сценам (4D-фотограмметрия), определение физических свойств поверхностей, мгновенный рендеринг через Gaussian Splatting и интеграция с текстовыми запросами (редактирование голосом). Можно с уверенностью утверждать, что использование ИИ в разработке алгоритмов компьютерного зрения будет только расти, расширяя возможности как геодезических инструментов, так и кино, игровой и фотоиндустрии, обучающих систем, медицины, а также находя применение у рядовых пользователей для их повседневных нужд. ИИ не просто ускоряет процессы, он меняет саму математическую основу получения 3D-данных, переходя от сопоставления пикселей к предсказанию и генерации, не заменяя фотограмметрию, но делая её «умной» и массовой. Однако останутся проблемы этического характера, связанные, в частности, с вопросами соблюдения авторских прав на используемые изображения и с появлением эффектов галлюцинирования ИИ [4].

Список использованных источников

1. Панина, Е.А. Влияние входных данных и алгоритмические сложности в задаче 3D-реконструкции по фотографиям / Е.А. Панина, Ю.С. Белов // Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе. Материалы конференции. – Москва, 2025. – С. 223-226.
2. Видяев, К.А. Создание реалистичных текстур 3D моделей с помощью фотограмметрии / К.А. Видяев, И.А. Крысин, И.В. Чухраев // Электронный журнал: наука, техника и образование. – 2025. – № 1 (51). – С. 6-10.3.
3. Романюго, В.А. Выявление особенностей генерации 3D-моделей из 2D-изображений / В.А. Романюго, Л.Б. Филиппова // Новые горизонты. XII научно-практическая конференция с стиём: сборник материалов и докладов. – Брянск, 2025. – С. 590-592.
4. Зенков, Н.А. Галлюцинации искусственного интеллекта и способы их предотвращения / Н.А. Зенков, Л.А. Сазанова // Наукосфера. – 2026. № 2-2. – С. 1-7.

AUTOMATION OF PHOTOGRAMMETRIC IMAGE PROCESSING USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEMS

E.E. Drobysheva, N.A. Zenkov, A.A. Kuzmina, L.A. Sazanova

*Ural State Economic University,
Ekaterinburg, Russia*

This work identifies the problem of the lack of an optimal software solution for three-dimensional reconstruction of objects, balanced in price and quality, whose main tool is photogrammetry. The classical principles of photogrammetry, based on the laws of optics, geometry and other sections of physics and mathematics, as well as the problems that arise when using them are listed. The necessity of using neural network algorithms in the creation of software for solving computer vision problems is substantiated, the joint use of which with classical ones promises to obtain optimal results.

Key words: computer vision, photogrammetry, 3D reconstruction, artificial intelligence, neural networks.

УДК 666.3.022.1

ШАМОТ КАК ОТОЩАЮЩИЙ МАТЕРИАЛ В КЕРАМИКЕ

А.А. Дружинина¹

*Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова,
г. Архангельск, Россия*

В статье рассматриваются технологические аспекты использования шамота как отощающего материала в области керамики. На основе проанализированных данных, представленных в современной научной литературе установлено, что введение шамота влияет на структуру, реологические и физико-

¹ Научный руководитель: А.И. Макеев – ассистент кафедры лесопромышленных производств и обработки материалов ВИШ.

механические свойства керамических материалов. Установлено, что количество шамота, его фракционный состав и размер зерен – ключевые факторы, влияющие на качество кислотоупорной плитки, клинкерного кирпича и строительной керамики. Обосновывается перспективность использования шамота в качестве вторичного сырья с точки зрения экономии ресурсов.

Ключевые слова: *шамот, отощающий материал, керамические массы, технологические свойства керамики, усадка, клинкерный кирпич, кислотоупорная плитка, рециклинг в керамической промышленности, фракционный состав шамота, термостойкость керамики.*

В современной керамике одной из самых важных проблем является регулирование процессов усадки и повышение трещиностойкости изделий на разных стадиях производства. Самое эффективное решение – введение в состав глинистого сырья отощающих материалов – добавок, снижающих пластичность и степень усадки сырья при сушке и обжиге, повышающих трещиностойкость и термостойкость готовых изделий. Из всех вариантов отощителей выделяется шамот – предварительно обожженная и измельченная керамическая масса.

Актуальность статьи заключается в росте интереса к принципам циркулярной экономики в материаловедении. Как пишут исследователи, добавление обожженных осколков керамики в шихту – это один из древнейших, но очень современных методов переработки отходов.

Цель данного исследования – систематизировать имеющиеся данные о том, как шамот влияет на технологические свойства керамических масс и физико-механические характеристики готовых материалов.

Шамот получают путем обжига огнеупорных глин или каолина при 1300-1500 °С. В результате обработки сырье теряет химически связанную воду, вследствие чего теряет пластичность и частично спекается. По степени спекания шамот разделяют на высокожженный и низкожженный. В первом случае он обладает пониженным влагопоглощением – от 2-3 до 8-10 %. Во втором показатель выше – до 20-25 %. Водопоглощение в данном случае – это косвенный индикатор степени спекания [2].

После обжига шамот подвергается дроблению и измельчению до нужного размера фракций. В художественной и строительной керамике чаще всего используют зерна от 0,2 до 5 мм. При таком размере масса достаточно отощается, но сохраняются приемлемые свойства для формирования изделий.

Введение шамота в керамические массы приводит к нарушению целостности пластичного глинистого связующего. Зерна шамота, не подвержены усадке при сушке и обжиге, образуют каркас. Это компенсирует усадку пластичной глины примерно на 10-18 %. Благодаря этому предотвращается растрескивание изделий в процессе сушки, а также коробление и разрушение.

В работе П.И. Манака описано, что физико-механические свойства зависят от фракционного состава вводимого шамота. Если использовать

шамотную пыль вместе с отсевами дробления горных пород и речным песком, можно регулировать структуру материала и его характеристики [4]. Чем больше шамота в составе керамических масс, тем выше прочность и термостойкость изделия, но тем ниже пластичность сырья. При превышении оптимальной концентрации, глинистого связующего становится недостаточно, и масса становится непригодной для формовки изделия [1].

В производстве строительного керамического кирпича и клинкерных изделий шамот является эффективным регулятором процесса спекания. Меняя количество добавки, можно управлять структурно-реологическими свойствами керамических масс. Это позволяет снизить количество брака, возникающего на стадии формирования и в процессе сушки изделия [1]. Особенно важно в работе с легкоплавкими полимерными глинами, которые склонны к сильным деформациям в процессе обжига.

Для массового производства керамического кирпича на многих заводах, например на ОАО «Обольский керамический завод», в качестве отощающей добавки используют пылевидная фракция шамота до 0,16 мм, который вводится в массы в количестве 12-18 % от массы шихты [4]. В таком диапазоне процесс создания изделий проходит нормально, а качество продукции остается стабильным.

В производстве специальных изделий, например кислотоупорной плитки, требования к дозировке шамота становятся выше. По данным статьи «Новые технологии и составы по рециклингу отходов цветной металлургии» введение 40 % шамота в керамическую массу является оптимальным при обжиге 1300 °С. Плитки, полученные при таких параметрах получают марку КШ (кислотоупорные шамотные) и соответствуют требованиям ГОСТ 961-89. При превышении количества добавленного шамота падает пластичность сырья, что усложняет процесс формирования изделий [1].

В современной науке о керамических материалах вовлечение в техногенный оборот отходов промышленности, содержащих компоненты, аналогичные шамоту, является перспективным. Такой подход выгоден с эколого-экономической точки зрения. Он сочетает ресурсосбережение и улучшение технологических свойств продукции, благодаря чему открываются возможности для создания новых композиционных материалов от архитектурной керамики до сырья для 3D-печати.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что шамот остается одним из самых удобных и эффективных отощающих материалов в области современной керамики. Введение такой добавки влияет на технологические свойства керамических масс и качество готовых изделий. Самое важное – регулирование дозировки вводимого шамота и его классификация. Система «шамот – глинистое связующее» можно взять за основу для модельной композиции, которая позволяет менять реологию и физико-механику материала.

Список использованных источников

1. Абдрахимова, Е.С. Исследование влияния нанотехногенного сырья и шамота на структурно-реологические свойства керамических масс и физико-механические свойства кислотоупоров / Е.С. Абдрахимова, В.З. Абдрахимов // Химическая технология. – 2018. – Т. 19, № 12. – С. 548–557.
2. Абдрахимова, Е.С. Новые технологии и составы по рециклингу отходов цветной металлургии в производство кислотоупоров без применения традиционного природного сырья / Е.С. Абдрахимова // Цветные металлы. – 2024. – № 6. – С. 47–52.
3. Гречаников, А.В. Исследование влияния добавок неорганических отходов на физико-механические свойства кирпича керамического / А.В. Гречаников [и др.] // Новое в технике и технологии в текстильной и легкой промышленности: материалы докладов международной научно-технической конференции, Витебск, 25–26 ноября 2015 г. / УО «ВГТУ». – Витебск, 2015. – С. 263–264.
4. Манак, П. И. Влияние фракционного состава шамота на свойства керамических клинкерных изделий / П. И. Манак [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сборник научных трудов: в 3 кн. / ФТИ НАН Беларуси. – Минск, 2023. – Кн. 1. – С. 177–186.
5. Chamotte for the production of ceramics and refractories / Imerys Group. – 2023. – Текст : электронный // Imerys: [сайт]. – URL: <https://www.imerys.com> (дата обращения: 07.05.2026).
6. Holmqvist, E. Why not let them rest in pieces? Grog-temper, its provenance and social meanings of recycled ceramics in the Baltic Sea region (2900–2300 BCE) / E. Holmqvist // Archaeometry. – 2021. – Vol. 64, № 2. – P. 345–362. – DOI: 10.1111/arc.12727.

CHAMOTTE AS A DRAINING MATERIAL IN CERAMICS

A.A. Druzhinina¹

*Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov,
Arkhangelsk, Russia*

The article discusses the technological aspects of using chamotte as a tempering material in the field of ceramics. Based on the analyzed data presented in modern scientific literature, it has been established that the introduction of chamotte affects the structure, rheological, and physical and mechanical properties of ceramic materials. It has been determined that the amount of chamotte, its fractional composition, and grain size are key factors that influence the quality of acid-resistant tiles, clinker bricks, and construction ceramics. The article also highlights the potential of using chamotte as a secondary raw material for resource conservation purposes.

Keywords: *chamotte, tempering material, ceramic bodies, technological properties of ceramics, shrinkage, clinker brick, acid-resistant tiles, recycling in the ceramic industry, fractional composition of chamotte, thermal resistance of ceramics.*

¹ Scientific supervisor: A. I. Makeev – Assistant at the Department of Forestry and Materials Processing at the Higher Engineering School.

ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР В ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ТРАВМАТИЗМЕ: АНАЛИЗ ПРИЧИН ОШИБОК МОЛОДЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ НА СТАРТЕ КАРЬЕРЫ

С.А. Егорова, Р.Ф. Закирова¹

*Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия*

В статье рассматривается проблема повышенного уровня производственного травматизма среди молодых специалистов в период их профессиональной адаптации. Анализируются психофизиологические и социальные причины ошибок, вызванных человеческим фактором. На основе эмпирических данных и научных исследований предлагается модель «критических точек» адаптации и система мер по снижению рисков, включая трансформацию института наставничества.

Ключевые слова: производственный травматизм, человеческий фактор, молодые специалисты, охрана труда, наставничество, психологическая безопасность, недостаточная квалификация, введение в должность, профилактика несчастных случаев.

Начальный этап профессиональной деятельности представляет собой один из наиболее уязвимых периодов в карьере любого специалиста. Согласно статистике, около 35% всех несчастных случаев на производстве приходится на сотрудников с опытом работы в организации менее одного года. Особую тревогу вызывают показатели среди молодежи: работники младше 25 лет получают травмы на производстве в два раза чаще, чем их более опытные коллеги. В то время как опытный сотрудник полагается на отработанные до автоматизма действия и интуитивное понимание ситуации, новичок оказывается в плену информационного перегруза, стресса и недостатка практических навыков [5].

Актуальность данной проблемы усиливается демографическими изменениями на рынке труда. Уход поколения бэби-бумеров на пенсию создает дефицит кадров, который восполняется притоком молодых специалистов, часто обладающих высоким уровнем теоретических знаний, но испытывают недостаток в прикладных компетенциях, особенно в сфере охраны труда.

Для эффективного управления рисками крайне важно отказаться от стереотипа о том, что молодые специалисты травмируются исключительно по причине невнимательности. Причины ошибок новичков можно разделить на физиологические и когнитивные [6].

Вопреки распространённому мнению, молодой организм не всегда является гарантией безопасности. С точки зрения охраны труда, работники до 25 лет находятся на стадии завершения своего физического формирова-

¹ Научный руководитель: к.т.н., доц. Гайнуллина Л.Р.

ния. Их опорно-двигательный аппарат и нервная система более подвержены негативному воздействию перегрузок и вредных производственных факторов. Более того, травма, полученная в этом возрасте, может иметь более долгосрочные и серьезные последствия для качества жизни, чем аналогичное повреждение у 50-летнего работника.

Основная масса ошибочных действий новичков спровоцирована тремя ключевыми психологическими состояниями: спешка, фрустрация и двусмысленность.

Спешка возникает из-за стремления молодого специалиста не отставать от более опытных коллег, что нередко приводит к пропуску обязательных этапов рабочего процесса.

Фрустрация порождается несоответствием между теоретическими знаниями, полученными в учебном заведении, и реалиями производственной деятельности. Это вызывает повышенную тревожность и рассеивает внимание [3].

Двусмысленность проявляется, когда новичок не осведомлен о скрытых опасностях, стесняется задать уточняющие вопросы наставнику и вынужден действовать методом проб и ошибок, что в большинстве случаев ведет к аварийной ситуации [3].

Ключевой причиной высокого травматизма является также разрыв между академическим образованием и реальным производством. Пилотные проекты по независимой оценке квалификации выпускников инженерных специальностей показали, что студенты демонстрируют высокие результаты в теоретических тестах, однако практическая часть выявляет недостаточную сформированность навыков решения реальных производственных задач [2]. Этот феномен известен как несоответствие навыков, когда формальный уровень образования превышает реальную способность безопасно выполнять рабочие обязанности. Вузы дают понимание нормативной базы, но не формируют мышечную память безопасных действий и навык предвидения потенциальных опасностей.

Анализ факторов, влияющих на адаптацию, позволяет выделить три критические точки. Первые три дня – точка ориентации, высок риск травмы из-за недостаточного знания расположения опасных зон. Первые три недели – точка ложной уверенности, когда работник освоился, но еще не научился распознавать нестандартные угрозы, растет самоуверенность и снижается самоконтроль. От трех до шести месяцев – точка монотонности, когда работа перестает быть новой, но навыки еще не доведены до автоматизма, снижается бдительность [4].

Традиционный подход к наставничеству по принципу «делай как я», становится менее эффективным для нового поколения работников. Эффективная профилактика должна базироваться на системном наставничестве, закрепленном в локальных нормативных актах. Согласно требованиям трудового законодательства, наставничество должно быть выделено в отдельный оплачиваемый функционал, отличный от простого инструктажа на рабочем месте [1].

Анализ эффективности организационных мер показывают, что снижению травматизма среди сотрудников с недостаточным уровнем квалификации способствуют три ключевых фактора. Во-первых, работа в команде, исключая ситуацию, когда новичок остается один на один с неопределенностью. Во-вторых, предоставление четкой информации посредством понятных инструкций и алгоритмов. В-третьих, индивидуализированный подход к обучению, включающий детальный анализ допущенных ошибок. При этом тотальный контроль без обратной связи неэффективен – он повышает тревожность и провоцирует сокрытие мелких ошибок. Наставник должен выступать в качестве фасилитатора безопасного поведения, помогая новичку самостоятельно прийти к правильному решению [5].

Следовательно, человеческий фактор в травматизме молодых специалистов – это не синоним халатности, а комплексное явление, включающее физиологическую незрелость, когнитивные ловушки (спешка, двусмысленность) и несоответствие теоретических знаний реальным рабочим условиям. Для снижения рисков на начальном этапе профессионального пути необходимо не ужесточать санкции, а гуманизировать процессы адаптации.

Основным инструментом предотвращения травм является актуальная система наставничества, основанная на принципах командной работы, материальном стимулировании наставников, психологической поддержке новых сотрудников и персонализированном анализе их ошибок. Вложения в грамотно организованный процесс введения в должность представляет собой наиболее действенный метод профилактики производственного травматизма.

Список использованных источников

1. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 № 197-ФЗ (ред. от 22.04.2024). – Ст. 351.8 «Особенности регулирования труда работников, выполняющих работу на условиях наставничества» .
2. Департамент труда и занятости населения Томской области [Электронный ресурс]. – 2025. – URL: <https://spk-sts.ru/prensa/novosti/nezavisimaya-otsenka-kvalifikatsii-vypusknikov-vyshshikh-uchebnykh-zavedeniy-tomskoy-oblasti.html>
3. Беляков, Г.И. Безопасность жизнедеятельности. Охрана труда в 2 т. Том 2: Учебник для академического бакалавриата / Г.И. Беляков. – Люберцы: Юрайт, 2020. – 352 с.
4. Человеческий фактор безопасности труда. Журнал по охране труда [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: <https://protrud.com>
5. Проект «Наставничество» в области охраны труда: опыт внедрения и результаты // Холдинговая Компания «ОЗНА». – 2024.
6. Письмо Федеральной службы по труду и занятости от 6 мая 2025 г. [Электронный ресурс]. – 2025. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/411912788/?ysclid=mo4k9d0lxr335301288>

THE HUMAN FACTOR IN OCCUPATIONAL INJURIES: AN ANALYSIS OF THE CAUSES OF MISTAKES BY YOUNG PROFESSIONALS AT THE START OF THEIR CAREERS

S.A. Egorova, R.F. Zakirova¹

*Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia*

The article deals with the problem of the increased level of occupational injuries among young professionals during their professional adaptation. The psychophysiological and social causes of errors caused by the human factor are analyzed. Based on empirical data and scientific research, a model of «critical points» of adaptation and a system of risk mitigation measures, including the transformation of the mentoring institute, are proposed.

Keywords: *occupational injuries, human factor, young professionals, occupational safety, mentoring, psychological safety, insufficient qualifications, induction, accident prevention.*

УДК 004.9:620.9

ВЫЗОВЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

И.И. Едиханов

*Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия*

В работе рассматривается цифровая трансформация энергетического сектора в качестве важнейшего фактора, определяющего конкурентоспособность в условиях глобализации мировой экономики. Прослеживается путь эволюции от автоматизации локальных операций к тотальной цифровизации всех этапов производственно-сбытовой цепочки в топливно-энергетическом комплексе. Основной акцент сделан на анализе актуальных технологических направлений, среди которых распределённая генерация, интеллектуальные системы управления и платформенные архитектуры. Исследуются проблемы, связанные с обеспечением кибербезопасности, изменением структуры занятости и необходимостью совершенствования нормативно-правовой базы. Опираясь на анализ отечественной и зарубежной практики, авторы предлагают рекомендации по стратегическому развитию цифровой энергетики.

Ключевые слова: *цифровая трансформация, энергетическая отрасль, распределённая генерация, промышленный интернет вещей, кибербезопасность, интеллектуальные системы, правовое регулирование.*

Энергетический сектор в настоящее время переживает эпоху глубинных преобразований, вызванных процессами цифровизации. Если на на-

¹ Scientific supervisor: Gainullina L. R.

чальных этапах внедрение цифровых технологий сводилось в основном к автоматизации отдельных производственных операций, то сегодня подобные решения пронизывают все направления деятельности энергетических компаний – от разведки месторождений и добычи ресурсов до предоставления сервисов конечным потребителям. Цифровая трансформация перестала быть лишь средством повышения эффективности; она превратилась в стратегический императив, от которого напрямую зависит способность предприятий выдерживать конкуренцию на мировых энергетических рынках.

На современном этапе развития отрасли наблюдается внедрение целого ряда передовых технологий.

Прежде всего, речь идёт о распределённой энергетике, которая демонстрирует стремительный рост во всём мире. По прогнозам экспертов, уже к 2025 году объёмы ввода распределённых генерирующих мощностей могут в три раза превзойти аналогичные показатели для традиционной централизованной генерации.

Кроме того, большое значение приобретают интеллектуальные системы управления, функционирующие на базе интернета вещей и технологий работы с большими массивами данных. Благодаря им становится возможным переход от реактивного обслуживания оборудования (устранения неполадок по факту их возникновения) к проактивному подходу, при котором потенциальные сбои прогнозируются заранее, а графики технического обслуживания оптимизируются с учётом реального состояния устройств.

Ещё одним важным направлением выступают цифровые двойники производственных процессов. Данная технология позволяет моделировать функционирование энергообъектов и искать оптимальные режимы их работы в виртуальной среде, прежде чем вносить какие-либо изменения в реальные физические процессы.

Наряду с явными преимуществами цифровизация порождает и новые риски, для управления которыми необходим системный подход.

В первую очередь это касается кибербезопасности. Подключение ранее изолированных промышленных систем к глобальной сети Интернет открывает дополнительные каналы для атак злоумышленников, что требует разработки и внедрения специализированных систем защиты, учитывающих специфику энергетической инфраструктуры.

Следующий вызов связан с регуляторными барьерами. Действующая нормативно-правовая база часто не поспевает за стремительными технологическими изменениями, что создаёт препятствия для внедрения инновационных бизнес-моделей и ограничивает потенциал цифровизации.

Не менее остро стоит проблема кадрового дефицита. Трансформация отрасли требует от специалистов принципиально новых компетенций на стыке энергетики и информационных технологий, что, в свою очередь, диктует необходимость пересмотра сложившихся систем профессиональной подготовки и повышения квалификации.

В Российской Федерации в рамках отраслевого проекта «Цифровая энергетика» реализуется комплекс мероприятий, направленных на цифровую трансформацию топливно-энергетического комплекса. К числу ключевых инициатив относятся:

- формирование единой системы стандартов и требований в области цифровизации;
- создание доверенной цифровой среды, обеспечивающей интеграцию разнородных решений;
- совершенствование нормативной базы для внедрения интеллектуальных приборов учёта и систем управления спросом;
- стимулирование партнёрских отношений между энергетическими компаниями и разработчиками технологических решений.

Для наглядного обобщения рассмотренных технологических трендов, вызовов и перспективных направлений ниже представлена сводная таблица.

Таблица 1 – Основные направления, вызовы и перспективы цифровой трансформации энергетики

Категория	Содержание	Ожидаемые эффекты / риски
Технологические тренды	Распределённая генерация (рост в 3 раза к 2025 г. по сравнению с централизованной)	Повышение гибкости и надёжности энергоснабжения, снижение потерь при передаче
	Интеллектуальные системы управления	Переход от реактивного к проактивному обслуживанию, прогнозирование сбоев
	Цифровые двойники технологических процессов	Оптимизация режимов работы без вмешательства в физические процессы, снижение аварийности
Ключевые вызовы	Кибербезопасность (рост числа векторов атак на промышленные системы)	Необходимость специализированных систем защиты, риск каскадных аварий
	Регуляторные барьеры (отставание нормативной базы от технологий)	Сдерживание инновационных бизнес-моделей, правовая неопределённость
	Кадровый дефицит (нехватка специалистов с междисциплинарными компетенциями)	Потребность в пересмотре системы профессиональной подготовки
Российские инициативы (проект «Цифровая энергетика»)	Единые стандарты и требования к цифровизации	Унификация решений, совместимость систем разных производителей
	Доверенная цифровая среда для интеграции	Безопасный обмен данными между участниками рынка
	Нормативная база для интеллектуального учёта	Стимулирование энергосбережения, точное ценообразование
	Партнёрство энергокомпаний и IT-разработчиков	Ускорение внедрения инноваций, импортозамещение
Стратегические перспективы	Формирование сбалансированной экосистемы (технологии + регулирование + кадры)	Сохранение конкурентоспособности России на глобальном энергетическом рынке
	Технологический суверенитет в сфере цифровой энергетики	Снижение зависимости от зарубежного ПО и оборудования

Цифровая трансформация энергетической отрасли представляет собой сложный многоаспектный процесс, требующий скоординированных усилий всех заинтересованных сторон – от государственных регуляторов до частных компаний и образовательных учреждений. Ключевым условием успеха выступает способность сформировать сбалансированную экосистему, в которой органично сочетаются технологические инновации, гибкое нормативное регулирование и системная подготовка квалифицированных кадров. Для России цифровая трансформация топливно-энергетического комплекса – это не просто технологическая задача, а важнейший фактор сохранения конкурентных позиций на глобальном энергетическом рынке и обеспечения технологического суверенитета.

Список использованных источников

1. Абрамов, В.И. Цифровая энергетика: технологии и управление / В.И. Абрамов, И.С. Семенов. – М.: Энергоатомиздат, 2022. – 256 с.
2. Веников, В.А. Цифровые двойники в электроэнергетике: от теории к практике / В.А. Веников, М.Д. Григорьев. – СПб.: Политехника, 2023. – 189 с.
3. Горбунов, А.С. Вызовы и перспективы цифровой трансформации топливно-энергетического комплекса России / А.С. Горбунов, К.А. Дмитриева // Энергетическая политика. – 2023. – № 5 (183). – С. 54–67.
4. Закиров, Р.Р. Внедрение технологий Интернета вещей (IoT) в интеллектуальные энергосистемы / Р.Р. Закиров, Е.Л. Петрова // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2022. – № 4. – С. 103–115.
5. Ковалев, А.А. Искусственный интеллект и большие данные в управлении режимами электроэнергетических систем / А.А. Ковалев, Н.В. Сидорова // Автоматика и телемеханика. – 2024. – № 1. – С. 78–95.
6. Смирнов, Е.В. Кибербезопасность как ключевой вызов цифровой трансформации энергетики / Е.В. Смирнов // Безопасность информации. – 2023. – Т. 10, № 2. – С. 45–53.

CHALLENGES AND PROSPECTS OF DIGITAL TRANSFORMATION IN THE ENERGY INDUSTRY

I.I. Edikhanov

*Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia*

The article examines the digital transformation of the energy sector as a critical factor determining competitiveness in the global economy. The evolution from the automation of individual operations to comprehensive digitalization of the entire value chain in the fuel and energy complex is traced. Special emphasis is placed on the analysis of current technological trends, including distributed generation, intelligent control systems, and platform solutions. The challenges related to cybersecurity, labor market transformation, and the need to improve the regulatory framework are investigated. Based on the analysis of Russian and international experience, recommendations for the strategic development of digital energy are formulated.

Keywords: digital transformation, energy industry, distributed generation, industrial internet of things, cybersecurity, intelligent systems, regulatory framework.

СТРАТЕГИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНЫХ ВЫЗОВОВ

И.И. Едиханов, О.Е. Куракина

*Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия*

В статье систематизированы современные стратегии обеспечения стабильности энергоснабжения в условиях глобальных вызовов: климатических изменений, санкционных ограничений, цифровой трансформации и роста доли возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Проанализированы ключевые угрозы для энергосистем, включая интермиттентность ВИЭ, кибератаки, экстремальные погодные явления и дефицит генерирующих мощностей. Предложена классификация глобальных вызовов по группам (климатические, технологические, геополитические, киберугрозы, социально-экономические). Рассмотрены три группы стратегий повышения устойчивости: технические (модернизация сетевой инфраструктуры, внедрение систем накопления энергии, цифровизация управления, развитие микрогридов), организационные (аварийное резервирование, межсистемные связи, управление спросом) и экономические (тарифное стимулирование, страхование рисков, импортозамещение).

Ключевые слова: *стабильность энергоснабжения, энергетическая безопасность, возобновляемые источники энергии (ВИЭ), накопители энергии, цифровизация энергетики, микрогриды, интермиттентность, автоматизированные системы управления.*

Энергоснабжение является критически важной инфраструктурной составляющей современного общества. Стабильное и бесперебойное обеспечение потребителей электрической и тепловой энергией определяет не только экономическое развитие государств, но и национальную безопасность, социальную стабильность и качество жизни населения. Однако в последние десятилетия энергосистемы по всему миру сталкиваются с беспрецедентными вызовами, требующими пересмотра традиционных подходов к обеспечению их устойчивости.

Глобальные вызовы можно разделить на несколько взаимосвязанных групп. Во-первых, это климатические изменения, приводящие к учащению экстремальных погодных явлений – ураганов, ледяных дождей, аномальной жары и морозов, наводнений. Эти явления напрямую воздействуют на объекты генерации и сетевую инфраструктуру, вызывая аварийные отключения. Во-вторых, это технологическая трансформация, связанная с активным внедрением возобновляемых источников энергии (ВИЭ), которые характеризуются нестабильностью (интермиттентностью) выработки. В-третьих, это геополитические и санкционные риски, ограничивающие доступ к технологиям, оборудованию и обслуживанию. В-четвёртых, это киберугрозы, поскольку современные энергосистемы становятся всё более цифровыми и уязвимыми для хакерских атак.

Для выработки адекватных стратегий необходимо чёткое понимание природы угроз. В таблице 1 приведена классификация основных глобальных вызовов по их происхождению и характеру воздействия на энергосистемы.

Таблица 1 – Глобальные вызовы для энергосистем

Группа вызовов	Конкретные угрозы	Характер воздействия
Климатические	Экстремальные температуры, ураганы, наводнения, гололёд, лесные пожары	Повреждение инфраструктуры (опоры ВЛ, подстанции), снижение эффективности ТЭС и ВИЭ
Технологические	Интермиттентность ВИЭ, старение основных фондов, дефицит мощностей, аварии	Нестабильность частоты и напряжения, каскадные отключения, дефицит мощности
Геополитические	Санкции, ограничение поставок оборудования, повреждение объектов (диверсии)	Невозможность замены оборудования, задержки ремонта, снижение резервов
Киберугрозы	Атаки на АСУ ТП, SCADA-системы, вымогатели, фишинг	Нарушение управления, ложные команды, отключение подстанций, хищение данных
Социально-экономические	Рост потребления, урбанизация, дефицит квалифицированных кадров	Перегрузка сетей, ошибки персонала, рост аварийности

Анализ таблицы показывает, что большинство вызовов носят комплексный характер – климатические события могут усиливать технологические проблемы, а кибератаки – накладываться на геополитические риски. Поэтому стратегии обеспечения стабильности должны быть системными и многоуровневыми.

Технические стратегии направлены на повышение физической устойчивости энергосистемы за счёт модернизации оборудования, внедрения новых технологий и автоматизации управления. Основой стабильного энергоснабжения является надёжная и гибкая сетевая инфраструктура. Ключевые направления модернизации включают:

1. Замена морально и физически устаревшего оборудования (трансформаторов, выключателей, линий) на современные аналоги с повышенной надёжностью и ресурсом. Особенно актуально для стран постсоветского пространства, где значительная часть основных фондов эксплуатируется сверх нормативного срока (30–40 лет).

2. Строительство новых линий электропередачи (ЛЭП) и подстанций для устранения «узких мест» и создания кольцевых и резервных схем. Важным трендом является переход на кабельные линии (КЛ) в городах и элегазовые комплектные распределительные устройства (КРУЭ) для повышения компактности и надёжности.

3. Применение проводов нового поколения (высокотемпературных, с композитным сердечником), позволяющих увеличить пропускную способность существующих ЛЭП без замены опор.

Интермиттентность возобновляемых источников (солнечной и ветровой генерации) является одним из главных вызовов для стабильности. Системы накопления энергии (СНЭ), особенно литий-ионные аккумуляторные батареи (Li-ion), а также проточные и натриево-серные батареи, позволяют сглаживать колебания выработки. Основные функции СНЭ:

- Перенос энергии во времени – зарядка в часы избыточной генерации ВИЭ и разрядка в часы пикового потребления или дефицита (арбитраж).

- Регулирование частоты – быстродействующие СНЭ (время отклика миллисекунды) эффективнее традиционных гидро- и газовых турбин для поддержания номинальной частоты 50/60 Гц.

- Резервирование – обеспечение бесперебойного питания (UPS) для критически важных потребителей (больницы, аэропорты, центры управления).

- Чёрный старт – возможность запуска энергосистемы с нуля при полном погашении без внешнего питания.

Примером масштабного внедрения СНЭ является Австралия, где Hornsdale Power Reserve (литий-ионный аккумулятор 150 МВт/194 МВт·ч) спасла энергосистему от коллапса и значительно снизила стоимость регулирования частоты.

Микрогриды (микросети) – это локальные энергосистемы, которые могут работать как синхронно с основной сетью, так и в изолированном (островном) режиме при аварии. Микрогрид объединяет:

- локальные источники генерации (газовые поршневые установки, дизель-генераторы, СЭС, ВЭС);

- системы накопления энергии;

- управляемые нагрузки;

- интеллектуальную систему управления (контроллер микрогрида).

Преимущества микрогридов: повышение надёжности для критических потребителей (аэропорты, больницы, дата-центры), снижение потерь за счёт генерации вблизи потребителя, возможность использования ВИЭ без ущерба для стабильности.

Технические решения должны дополняться организационными и экономическими механизмами, обеспечивающими устойчивость на системном уровне. Ни одна энергосистема не может быть абсолютно надёжной без резервов. Основные формы резервирования:

Генерационный резерв – вращающийся (горячий) резерв (турбины в работе, но недогружены) и холодный резерв (агрегаты, готовые к пуску в течение минут или часов). Норматив – не менее 15–20% от максимальной нагрузки.

Сетевой резерв – наличие альтернативных путей перетока мощности (кольцевые сети, резервные линии).

Межсистемные связи – соединения между соседними энергосистемами, позволяющие перераспределять мощность при авариях. Например, энергопоток между Восточной и Западной Европой, связи ЕЭС России с энергосистемами стран СНГ.

В условиях продолжающихся климатических изменений, технологической трансформации и геополитической нестабильности стабильность энергоснабжения становится не просто технической, а стратегической задачей национальной безопасности.

Список использованных источников

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд. – М.: НЦ ЭНАС, 2020. – 512 с.
2. ГОСТ Р 56520-2020. Трансформаторы силовые масляные. Методы испытаний.
3. Бычков, А.В. Надёжность систем электроснабжения / А.В. Бычков, Н.И. Суслов. – М.: Юрайт, 2022. – 312 с.
4. Кудряшов, А.А. Эксплуатация электрических сетей в условиях цифровой трансформации / А.А. Кудряшов. – СПб.: Лань, 2023. – 288 с.

STRATEGIES FOR ENSURING ENERGY STABILITY IN THE FACE OF GLOBAL CHALLENGES

I.I. Yedikhanov, O.E. Kurakina

*Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia*

The article systematizes modern strategies for ensuring energy supply stability in the face of global challenges: climate change, sanctions restrictions, digital transformation, and the growing share of renewable energy sources (RES). The key threats to energy systems, including the intermittency of RES, cyberattacks, extreme weather events, and a shortage of generating capacity, are analyzed. A classification of global challenges into groups (climate, technological, geopolitical, cyber threats, and socio-economic) is proposed. Three groups of sustainability enhancement strategies have been considered: technical (network infrastructure modernization, energy storage systems implementation, digitalization of management, and microgrid development), organizational (emergency backup, intersystem connections, and demand management), and economic (tariff incentives, risk insurance, and import substitution).

Keywords: energy supply stability, energy security, renewable energy sources (RES), energy storage, energy digitalization, microgrids, intermittency, automated control systems.

УДК 621.316.927

ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ОБЛАСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ И ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОВРЕЖДЕНИЙ КАБЕЛЕЙ

М.Д. Елфутин, Д.А. Каюмова

*Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия*

В данной работе представлены преимущества и ограничения методов искусственного интеллекта в смежных областях и рассмотрено влияние интеграции

распределительной генерации на анализ неисправностей. Приводится краткое изложение и перспективы будущих направлений исследований.

Ключевые слова: искусственный интеллект, машинное обучение, обнаружение и локализация повреждений кабелей, глубокое обучение.

Сигналы о повреждении кабеля обычно проявляются в виде бегущих волн, токов и напряжений нулевой последовательности или частичных разрядов, характеризующихся высокой размерностью, нестационарностью и значительными шумовыми помехами.

Традиционные методы в значительной степени опираются на признаки, разработанные вручную, что затрудняет выявление сложных закономерностей в сигналах. Большое количество данных, которые приходится обрабатывать вручную, вычленив полезный сигнал из ряда приходящих сигналов, является серьезным барьером на пути к стремительному развитию кабельной инфраструктуры.

Глубокое обучение – важнейшая область искусственного интеллекта. Оно направлено на создание моделей глубоких нейронных сетей для автоматического изучения иерархических представлений признаков на основе больших массивов данных. Этот подход, развивающийся на основе архитектур искусственных нейронных сетей, использует многослойные нелинейные преобразования для моделирования внутренних закономерностей данных [1]. С помощью функций активации и алгоритмов градиентного спуска эти модели могут постепенно оптимизировать пространство параметров, достигая высочайшей эффективности в таких задачах, как распознавание изображений, обработка естественного языка и анализ речи. Некоторые исследователи применили методы глубокого обучения для обнаружения и локализации повреждений в кабелях.

Цель состояла в том, чтобы использовать их возможности для обработки огромных объемов данных в энергосистемах нового поколения. Эти методы уже продемонстрировали беспрецедентные преимущества с точки зрения точности, скорости и адаптивности по сравнению с традиционными подходами [2].

С ростом потребности в данных в энергосистемах требования к эффективности их обработки и анализа становятся все более высокими, что приводит к применению ряда алгоритмов машинного обучения в методах обнаружения и локализации повреждений кабеля.

Алгоритмы машинного обучения – это в первую очередь этапы и процедуры, которые решают задачи оптимизации с помощью математических и статистических подходов. Для удовлетворения различных требований к моделям кабелей можно выбрать подходящие алгоритмы машинного обучения, которые позволят преодолеть ограничения традиционных методов, с трудом справляющихся с обработкой больших объемов данных и адаптацией к сложным современным электросетям.

Примером применения традиционного машинного обучения для обнаружения неисправностей в кабелях являются многослойные нейронные

алгоритмы распознавания образов, основанные на биологических нейронных сетях и обрабатывающие входные данные с помощью многослойной структуры узлов. Входной слой получает необработанные данные, а скрытые слои выполняют нелинейные преобразования с помощью весовых матриц, постепенно извлекая абстрактные признаки. Выходной слой генерирует результаты классификации или прогнозирования. Главное преимущество заключается в иерархическом извлечении признаков: нейроны нижних уровней распознают простые закономерности, а нейроны верхних уровней объединяют их в сложные признаки.

Ледесма и др. [3] предложили высокоимпедансный метод идентификации неисправностей для распределительных сетей, основанный на двухуровневой нейронной сети и синхронных измерениях, который эффективно решает задачи идентификации неисправностей в сложных распределительных сетях, учитывая при этом такие вопросы, как интеграция данных и реконфигурация сети. Результаты моделирования показывают, что обученная система обеспечивает точность идентификации неисправностей не менее 97,6% при одновременном учете реконфигурации сети, высокоимпедансных неисправностей и интеграции DG.

В 2023 году Гогула и соавторы [4] предложили метод обнаружения неисправностей с высоким импедансом. Он основан на интеграции алгоритма дискретного вейвлет-преобразования и нейронной сети с радиально-базисной функцией (NNRBF). Этот метод использует дискретное вейвлет-преобразование для разложения токов короткого замыкания и извлечения соответствующих собственных значений, которые затем используются в качестве входных данных для NNRBF. Тестирование на различных значениях сопротивления короткого замыкания показало, что точность обнаружения при использовании этого подхода достигает 100%.

Бинди и соавторы [5] разработали метод прогнозирования для предотвращения катастрофических сбоев в работе подземных кабелей среднего напряжения с использованием технологии Power Line Communication (PLC) и нейронного классификатора на основе MLMVN. Этот метод позволяет выявлять проблемы, связанные с перегревом кабеля. Точность классификации неисправностей составляет 96,03% в диапазоне частот 95–450 кГц. Точность классификации превышает 80% даже при соотношении сигнал/шум (SNR) белого шума, достигающем примерно 23 дБ.

Метод опорных векторов (Support Vector Machine, SVM) [6] – это алгоритм машинного обучения с учителем. Его основной принцип заключается в поиске гиперплоскости в пространстве признаков, которая максимизирует расстояние между выборками разных классов.

Точки выборки, лежащие на этих границах, называются опорными векторами. Для решения нелинейных задач используется функция ядра, которая преобразует входное пространство в многомерное пространство признаков, делая данные линейно разделимыми в этом новом пространстве.

Цель обучения методом опорных векторов заключается в решении задачи выпуклой оптимизации, которая минимизирует сумму структурного и

эмпирического рисков. При выявлении неисправностей в кабеле метод опорных векторов обычно используется для обработки векторов признаков, полученных на основе данных мониторинга кабеля, таких как статистические величины во временной области и распределения энергии в частотной области. Функция ядра выбирается на основе всестороннего учета вычислительной эффективности и степени нелинейности характеристик, что позволяет SVM различать нормальные рабочие состояния и различные типы неисправностей.

Абу-Руб и др. [7] применили алгоритм SVM для анализа структуры сигналов PD, что позволило идентифицировать и классифицировать дефекты внутренней изоляции в кабелях, тем самым повысив точность обнаружения неисправностей. Этот метод обеспечивает точность идентификации дефектов до 95,8% и точность классификации, превышающую 92% для единичных внутренних дефектов, что подтверждает перспективные возможности применения метода опорных векторов для обнаружения неисправностей в кабелях.

Саад и соавторы [8] предложили усовершенствованный метод диагностики неисправностей в кабелях среднего напряжения на основе метода опорных векторов. В методе используется многоклассовая машина опорных векторов (MCSVM) в области дробных Фурье-преобразований.

Используется метод опорных векторов «один против одного» (OVO) для создания всех возможных попарных классификаторов, что эффективно снижает вычислительную сложность. Результаты моделирования показывают, что при использовании этого подхода точность обнаружения неисправностей достигает 99,8 % при времени выполнения всего 0,01 с, что превосходит другие алгоритмы, такие как k-ближайших соседей, вероятностная нейронная сеть и многослойный перцептрон.

Что касается периодически возникающих замыканий на землю в распределительных сетях среднего напряжения (кВ), то Разми и соавторы [9] применили пять алгоритмов – метод опорных векторов, дискретное преобразование, долговременную и рекуррентную нейронные сети и многослойный перцептрон – для классификации неисправностей.

Адаптивная нейро-нечёткая система вывода (ANFIS) объединяет способность к адаптивному обучению нейронных сетей с преимуществами лингвистического вывода, присущими нечёткой логике, обеспечивая нелинейное отображение за счёт построения базы нечётких правил и оптимизации функций принадлежности.

В 2018 году Veerasamy и соавт. [10] предложили метод обнаружения и классификации высокоомных неисправностей в распределительных сетях среднего напряжения (MV) на основе DWT и ANFIS, где входными параметрами служили среднеквадратичные отклонения (SD) сигналов тока повреждения. По сравнению с традиционными системами нечеткой логики (FLS), их метод, основанный на ANFIS, демонстрирует на 33,37% более высокую точность при выявлении высокоимпедансных неисправностей и

на 15% улучшение в классификации типов нарушений в радиальных распределительных системах.

Основываясь на этой работе, Вирасами и соавторы [11] сравнили применение метода искусственного нейронного интерфейса с методами поддержки векторной машины, нечеткой логики, многослойного перцептрона и байесовского классификатора при классификации неисправностей. Результаты моделирования показывают, что метод искусственного нейронного интерфейса показал наилучшие результаты по таким показателям, как точность распознавания, средняя абсолютная ошибка (MAE), среднеквадратическая ошибка (RMSE) и коэффициент каппа.

Для высоковольтных линий электропередачи постоянного тока (HVDC) Педдакапу и соавторы [12] использовали три модуля ANFIS для выявления неисправностей, определения участков с неисправностями и полюсов с неисправностями. Рабочий процесс реализации, показанный на рисунке 8, демонстрирует снижение требований к частоте дискретизации и устраняет необходимость в дополнительных каналах связи, позволяя при этом определять участок с неисправностью за один цикл. В адаптивной схеме защиты для микросетей переменного тока был предложен подход, сочетающий в себе искусственные нейронные сети и ANFIS. В этом методе для предварительной обработки данных и создания входных данных для алгоритма ANFIS используются дискретное вейвлет-преобразование и искусственная нейронная сеть.

В рамках системы изоляции фидеров алгоритм на основе ANFIS обеспечивает точность обучения 92,3 % и время отклика 0,02 мс, что подтверждает его потенциал для применения в инженерных задачах.

Искусственные нейронные сети демонстрируют высокую эффективность при локализации повреждений в кабелях. Многие исследователи интегрируют их в различные модели энергосистем.

Фарзад и др. [13] применили искусственную нейронную сеть к 34-шинному тестовому фидеру IEEE, включающему две ветрогенераторные установки с постоянной скоростью вращения, и предложили метод определения места повреждения в несимметричных распределительных сетях с использованием распределенных источников энергии. На рисунке 9 видно, что глобальные входные данные дают меньшую погрешность при оценке, чем локальные.

При низкой мощности, подаваемой генератором, нейронная сеть обеспечивает низкую погрешность даже при использовании только локальных входных данных.

Кроме того, при повторном обучении нейронной сети с использованием входных данных, содержащих погрешности измерений, погрешность при тестировании оставалась в допустимых пределах.

В следующем году Фариас и соавторы представили новый подход к локализации высокочастотных источников, сочетающий решение уравнений «ток-напряжение» во временной области с онлайн-обучением нейронной сети. Этот метод использует полиномиальное моделирование четвер-

того порядка и онлайн-оценку параметров искусственной нейронной сети, что позволяет обойтись без дополнительного измерительного оборудования или корректировки пороговых значений. Максимальная погрешность составляет 2,3% при токовой неисправности 60 А, расположенной в 10 км от подстанции.

В последние годы Хамиди и соавторы использовали модель многослойного перцептрона (MLP) для анализа затухания частотных составляющих бегущей волны с применением метода главных компонент (МГК) для снижения размерности признаков. Этот подход имеет ряд преимуществ, таких как одностороннее измерение, отсутствие коммуникационной инфраструктуры и независимость от временной синхронизации. Чтобы восполнить пробел в исследованиях по локализации неисправностей в микросетях переменного тока, Джаясингхе и его соавторы использовали искусственную нейронную сеть для быстрой идентификации и локализации симметричных и несимметричных неисправностей в распределительных сетях микросетей переменного тока. Этот метод обеспечивает среднюю абсолютную ошибку 0,2122 при локализации неисправностей, демонстрируя высочайшую точность. Кроме того, предложенная схема генерирует выходные данные за короткое время отклика, что позволяет быстро локализовать неисправность и минимизировать потенциальный ущерб для микросетей. Это открывает многообещающие перспективы для применения в микросетях переменного тока в режиме реального времени.

Метод опорных векторов также применялся для локализации повреждений в кабелях. Еще в 2014 году Ливани и соавторы предложили гибридный метод определения места повреждения на линиях электропередачи с использованием классификатора на основе метода опорных векторов.

В литературе отмечается, что изменения индуктивности, вызванные старением, ухудшают оценку скорости распространения бегущей волны, тем самым снижая эффективность алгоритма. Для решения этой проблемы был введен поправочный коэффициент, преобразующий изменения параметров кабеля в изменения скорости.

Недавно, чтобы решить проблему с захватом волновых фронтов бегущих волн в подводных кабелях, Шуай и соавторы разработали модель кусочно-линейного сопоставления характеристик во временной области и расстояний до разрывов с использованием метода опорных векторов с регрессией методом наименьших квадратов (LSSVR). Этот алгоритм требует небольшого количества выборок данных, прост в вычислении и обеспечивает высокую точность, а также устойчив к изменению сопротивления разрывов, шуму при измерениях и распределенным параметрам кабеля. Экспериментальная проверка на платформе с аппаратным обеспечением в контуре управления RT-LAB подтверждает, что обученная модель определения места повреждения остается применимой при изменении параметров кабеля в реальных системах.

Генетические алгоритмы (ГА) – это эвристические алгоритмы оптимизации, которые имитируют биологический эволюционный процесс, эффективно отыскивая глобально оптимальные решения в пространстве решений, имитируя механизмы естественного отбора, генетической мутации и скрещивания популяций. Их основная концепция заключается в кодировании решений задачи в виде хромосом, формировании начальной популяции, оценке приспособленности особей на основе функции приспособленности и итеративном совершенствовании набора решений с помощью генетических операций, таких как отбор, кроссинговер и мутация. Здесь хромосомы представляют собой строки, описывающие предлагаемые решения задачи.

В зависимости от конкретной задачи хромосома может представлять собой строку дискретных переменных, двоичных или непрерывных значений. Структура хромосомы и ее параметры зависят от конкретных требований решаемой задачи. Этот алгоритм отличается параллельным поиском и высокой устойчивостью, что делает его особенно подходящим для решения задач оптимизации со сложными нелинейными данными в энергетических системах.

Лян и соавторы предложили новый метод локализации однофазных замыканий на землю в распределительных сетях, основанный на характеристиках распределения составляющих нулевой последовательности. Этот метод преобразует задачу определения места замыкания в оптимизацию максимального значения функции падения напряжения нулевой последовательности (ZVD). Метод решает эту задачу с помощью генетического алгоритма и обеспечивает точное определение места замыкания. Результаты моделирования демонстрируют высокую надежность метода при различных видах замыканий, при этом максимальная погрешность определения места замыкания составляет менее 0,22 %.

Чтобы решить проблему двунаправленного потока мощности, вызванного интеграцией распределенных генераторов, Мохаджер и соавторы предложили метод локализации неисправностей на основе модели линии электропередачи во временной области, в которой расстояния до места повреждения и сопротивления были дискретизированы и оптимизированы с помощью генетического алгоритма. Результаты показывают, что точность локализации практически не зависит от расстояния до места повреждения, сопротивления и угла сдвига фаз, а с увеличением доли распределенных генераторов точность повышается.

В 2023 году Псарас и соавторы представили метод локализации неисправностей в сетях постоянного тока высокого напряжения, сочетающий генетический алгоритм с восстановленными частотными профилями напряжения. При моделировании кабелей постоянного тока этот метод обеспечивает максимальную и среднюю погрешности в 0,326 % и 0,070 % соответственно при всех возможных неисправностях, демонстрируя отличную адаптивность к длинным линиям электропередачи и измерительным шумам при сохранении высокой инженерной применимости.

Эксперименты с аппаратным обеспечением в PSCAD/EMTDC подтверждают эффективность обученной модели в условиях изменения параметров кабеля в реальных системах [14].

По мере стремительного развития интеллектуальных сетей объем данных, генерируемых электросетями, растет в геометрической прогрессии. Такой стремительный рост обусловлен как сложностью современных энергосистем, так и значительными достижениями в области технологий сбора данных. Растущий объем и разнообразие данных предъявляют повышенные требования к обнаружению, идентификации и локализации повреждений кабелей. Искусственный интеллект решает эти задачи с помощью возможностей параллельных вычислений.

Таким образом, методологии на основе искусственного интеллекта могут обрабатывать огромные массивы данных в режиме реального времени, обеспечивая быстрое реагирование и анализ для «умных сетей». Это повышает оперативность реагирования на аномалии и обеспечивает стабильную работу системы в динамичных операционных средах [15].

Однако существуют значительные различия в вычислительной сложности и ресурсоемкости различных технологий искусственного интеллекта. Эти различия напрямую влияют на их практическую применимость и вычислительную эффективность при обработке данных энергосистемы.

Несмотря на то, что искусственный интеллект повысил эффективность и автоматизацию энергосистем в области обнаружения, идентификации и локализации повреждений кабелей, его развитие сталкивается с рядом ограничений: высокая зависимость от данных, плохая адаптивность к динамической среде, ограниченная надежность принимаемых решений.

Методы искусственного интеллекта основаны на обучении на основе данных, однако в реальных сценариях их применение затруднено из-за ограниченной доступности образцов повреждений и сильного дисбаланса классов по типам повреждений [16].

Модели искусственного интеллекта обычно обучаются на фиксированных топологических структурах, в то время как топология кабелей может динамически меняться с течением времени или под воздействием внешних факторов. Например, повышенная влажность может ухудшить качество сигнала от датчиков, а из-за старения оборудования могут измениться характеристики распространения бегущей волны в кабеле. Если не обновлять модели в ответ на эти изменения, это может привести к снижению производительности и ошибочным решениям. Поэтому при развертывании системы необходима адаптация моделей в режиме реального времени с учетом меняющихся условий эксплуатации, что еще больше повышает стабильность работы энергосистемы и ее экономическую эффективность.

Алгоритмы искусственного интеллекта, особенно модели глубокого обучения, работают по принципу «черного ящика», что делает их ненадежными. Сверточные нейронные сети, рекуррентные нейронные сети и

глубокие нейронные сети снижают интерпретируемость. Эти модели привлекают многомерные признаки с помощью нелинейных преобразований, что затрудняет понимание логики принятия решений и снижает доверие операторов к результатам идентификации неисправностей. Проблемы с доверием также возникают при проверке точности. Традиционная локализация неисправностей на основе физических законов опирается на поддающуюся количественной оценке электромагнитную теорию, в то время как прогнозы ИИ зависят от распределения обучающих данных.

Отклонения между обучающими данными и реальными условиями могут привести к ошибкам локализации, превышающим допустимые значения. В будущих исследованиях следует отдавать предпочтение гибридным структурам, сочетающим подходы, основанные на знаниях и данных, чтобы обеспечить баланс точности, эффективности и прозрачности.

Список использованных источников

1. Gataullin, A.M. Software and Hardware System of Monitoring High-Voltage Electric Equipment Based on the Analysis of Partial Discharge Characteristics / A.M. Gataullin, D. F. Gubaev, R. V. Gataullina // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) : Proceedings, Sochi, 15–19 мая 2023 года. – Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2023. – P. 171–176. – DOI 10.1109/UralCon59258.2023.10291128. – EDN TBYHZP.
2. Гатауллин, А.М. Комплексный метод оценки характера повреждений, их локализации и прогнозирования разрушения изоляторов высоковольтного электрооборудования по характеристикам частичных разрядов / А.М. Гатауллин, Д.Ф. Губаев // Проблемы региональной энергетики. – 2022. – № 1(53). – С. 152–160. – DOI 10.52254/1857-0070.2022.1-53.12. – EDN CYXKAF.
3. Ledesma, J.J.G.; do Nascimento, K.B.; de Araujo, L.R.; Penido, D.R.R. A two-level ANN-based method using synchronized measurements to locate high-impedance fault in distribution systems. *Electr. Power Syst. Res.* 2020, 188, 106576.
4. Gogula, V.; Edward, B. Fault detection in a distribution network using a combination of a discrete wavelet transform and a neural Network's radial basis function algorithm to detect high-impedance faults. *Front. Energy Res.* 2023, 11, 1101049.
5. Bindi, M.; Luchetta, A.; Lozito, G.M.; Carobbi, C.F.M.; Grasso, F.; Piccirilli, M.C. Frequency Characterization of Medium Voltage Cables for Fault Prevention Through Multi-Valued Neural Networks and Power Line Communication Technologies. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2023, 38, 3227–3237.
6. Hearst, M.A.; Dumais, S.T.; Osuna, E.; Platt, J.; Scholkopf, B. Support vector machines. *IEEE Intell. Syst. Their Appl.* 1998, 13, 18–28
7. Abu-Rub, O.H.; Khan, Q.; Refaat, S.S.; Nounou, H. Cable Insulation Fault Identification Using Partial Discharge Patterns Analysis. *IEEE Can. J. Electr. Comput. Eng.* 2022, 45, 31–41.
8. Saad, M.H.; Said, A. Machine learning-based fault diagnosis for research nuclear reactor medium voltage power cables in fraction Fourier domain. *Electr. Eng.* 2023, 105, 25–42.
9. Razmi, P.; Pashaei, M.; Karimi, M.; Kauhaniemi, K.; Simoes, M.G. Data-Driven Intermittent Earth Fault Detection in Compensated and Isolated MV Networks. In Pro-

ceedings of the 2024 International Workshop on Artificial Intelligence and Machine Learning for Energy Transformation (AIE), Vaasa, Finland, 20–22 May 2024; pp. 1–6.

10. Veerasamy, V.; Abdul Wahab, N.I.; Ramachandran, R.; Mansoor, M.; Thirumeni, M.; Lutfi Othman, M. High Impedance Fault Detection in Medium Voltage Distribution Network Using Discrete Wavelet Transform and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System. *Energies* 2018, 11, 3330.

11. Veerasamy, V.; Abdul Wahab, N.I.; Ramachandran, R.; Thirumeni, M.; Subramanian, C.; Othman, M.L.; Hizam, H. High impedance fault detection in medium-voltage distribution network using computational intelligence-based classifiers. *Neural Comput. Appl.* 2019, 31, 9127–9143. [CrossRef]

12. Peddakapu, K.; Srinivasarao, P.; Mohamed, M.R.; Liu, X.N.; Kishore, D.J.K. Faults identification in high voltage direct current transmission lines using adaptive neuro-fuzzy inference system. *Int. J. Model. Simul.* 2023, 43, 813–831.

13. Bretas, A.S.; Herrera-Orozco, A.R.; Orozco-Henao, C.A.; Iurinic, L.U.; Mora-Flórez, J. Incipient fault location method for distribution networks with underground shielded cables: A system identification approach. *Int. Trans. Electr. Energy Syst.* 2017, 27, e2465.

14. Gataullin, A. M. Automation of high-voltage electrical equipment insulators diagnostics by partial discharges method / A. M. Gataullin, D. F. Gubaev, R. R. Khusnutdinov // Proceedings – 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021, Sochi, 17–21 мая 2021 года. – Sochi, 2021. – P. 58–62. – DOI 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446304. – EDN HMPASI.

15. Gataullin, A. M. Development of method for high-voltage electrical equipment insulators monitoring in UHF range of electromagnetic radiation / A. M. Gataullin // Proceedings – 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020, Sochi, 18–22 мая 2020 года. – Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. – P. 9112023. – DOI 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112023. – EDN YCLTNE.

16. Gataullin, A. M. Insulators electrical strength estimation under AC applied voltage / A. M. Gataullin // Proceedings – 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2019, Chelyabinsk, 01–03 октября 2019 года. – Chelyabinsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 35–39. – DOI 10.1109/URALCON.2019.8877654. – EDN ASVGCE.

PROSPECTS FOR INTRODUCING ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE FIELD OF DETECTION AND LOCALIZATION OF CABLE DAMAGE

M.D. Yelfutin, D.A. Kayumova

*Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia*

This paper presents the advantages and limitations of artificial intelligence methods in related fields and examines the impact of integrating distributed generation on fault analysis. It provides a brief overview and prospects for future research areas.

Keywords: *artificial intelligence, machine learning, cable damage detection and localization, deep learning.*

ТЕНДЕНЦИИ ПЕРЕХОДА К МАШИННОМУ ОБУЧЕНИЮ В ОБЛАСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ И ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОВРЕЖДЕНИЙ КАБЕЛЕЙ

М.Д. Елфутин, И.И. Зиннатуллин

*Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия*

В данной работе представлены основные причины повреждений кабеля и представлены традиционные подходы к обнаружению и локализации повреждений. Проанализированы преимущества и недостатки традиционных методов для определения тенденции оптимизации структуры энергосистемы и ускорения создания энергосистемы нового типа путем внедрения машинного обучения.

Ключевые слова: обнаружение и локализация повреждений кабельных линий, машинное обучение, традиционные методы обнаружения и локализации повреждений, бегущая волна.

В будущем странам необходимо полностью внедрить новую концепцию развития и ускорить создание энергосистемы нового типа. Это подразумевает оптимизацию и укрепление структуры энергосистемы, увеличение доли электроэнергии из возобновляемых источников, развитие совместимых энергетических станций, а также реализацию инфраструктурных проектов с применением 5G, искусственного интеллекта (ИИ), Интернета вещей (IoT) и больших данных. Особое внимание следует уделить распределительным сетям – они играют ключевую роль в эффективности энергосистем, получая электроэнергию и распределяя её среди потребителей.

В процессе урбанизации широкое распространение получили кабели городских распределительных сетей, которые зачастую прокладываются глубоко под землёй в сложных условиях – это повышает риск аварийных ситуаций (частичных разрядов, пробоев). Особенно актуальна проблема для быстроразвивающихся энергосистем вроде китайской: к 2024 году выработка электроэнергии из возобновляемых источников в КНР достигла 3,46 трлн кВт·ч (на 541,9 млрд кВт·ч больше, чем годом ранее), что составляет около 86 % от общего прироста потребления. Традиционные методы обнаружения повреждений в кабелях имеют ограничения, поэтому всё активнее применяются решения на базе ИИ – они помогают преодолеть сложности с обработкой данных, сократить долю ручного труда и время отклика.

К основным неисправностям, приводящим к серьезным авариям и простою производства в кабельных линиях, можно отнести локальный перегрев, влага в изоляции, механическое повреждение.

Рассмотрим традиционные методы обнаружения и локализации повреждений в кабельных линиях на основе компьютерного моделирования.

При управлении распределительными сетями эффективное применение своевременных профилактических мер позволяет заблаговременно об-

наруживать и локализовывать зарождающиеся неисправности в кабелях, тем самым обеспечивая значительные эксплуатационные преимущества для энергетических компаний и снижая социальные потери. С точки зрения энергетических компаний, упреждающий мониторинг и диагностика потенциальных дефектов кабелей могут существенно снизить вероятность неожиданных сбоев, повысив надежность энергоснабжения и удовлетворенность потребителей [1]. С точки зрения безопасности, раннее обнаружение неисправностей снижает риск несчастных случаев, связанных с поражением электрическим током, вызванным старением изоляции, частичными разрядами или короткими замыканиями, тем самым обеспечивая безопасность персонала и населения при эксплуатации кабелей.

Традиционные методы обнаружения неисправностей в основном анализируют электрические величины, такие как бегущие волны, токи заземления и токи нулевой последовательности, во временной или частотной области, делая диагностические выводы на основе соответствующих расчетов и сравнений этих параметров [2].

Первые инженерные решения для обнаружения неисправностей в кабелях основывались на электрических характеристиках, которые позволяли быстро выполнять вычисления и были высокоэффективными.

Один из наиболее распространенных методов обнаружения неисправностей основан на принципе бегущей волны. Аль-Хассан и соавторы [3] предложили метод определения момента прихода напряжения на терминал с использованием подхода, основанного на разделении пространства волн, для систем с высоковольтными преобразователями напряжения постоянного тока (HVDC-VSC). Упрощенную модель бегущей волны использовали для описания физических свойств электрических сетей, которая учитывает влияние удельного сопротивления почвы и сопротивления экрана кабеля на физическую модель, что позволяет создать модель изменения напряжения при распространении бегущей волны по различным участкам линии. Также был представлен новый метод оценки состояния отдельных распределительных фидеров на основе интеграции данных о частоте переменного тока и информации о бегущей волне.

В 2023 году была предложена портативная система обнаружения и локализации частичных разрядов (ЧР) для онлайн-оценки состояния изоляции межмачтовых кабелей на ветряных электростанциях. В этой системе используется усовершенствованный метод двусторонней бегущей волны. Методика обнаружения частичных разрядов основана на импульсном двуполупериодном взаимодействии, синхронизирующихся по GPS.

Раджпут и соавторы [4] предложили модель SUGPDS (Smart Underground Power Distribution System) для выявления и классификации различных повреждений подземных силовых кабелей. Экспериментальные результаты демонстрируют превосходную способность системы обнаруживать и распознавать обрывы, короткие замыкания и замыкания на землю в силовых кабелях.

В 2022 году Пэн и соавторы [5] представили новый алгоритм обнаружения неисправностей, реализованный на периферийных узлах. Он использует только ток заземления на локальном конце кабеля для быстрого и надёжного обнаружения неисправностей. Этот метод требует только измерения тока в заземляющей линии с минимальной частотой дискретизации 3,2 кГц, что делает его более удобным для проведения измерений. Эксперименты показали, что этот подход обеспечивает точность обнаружения повреждения до 99 %.

Однако из-за того, что на точность и чувствительность электроизмерительных приборов влияют помехи на месте проведения измерений, добиться идеальных диагностических характеристик по-прежнему непросто. Многие исследователи сосредоточились на выявлении повреждений в кабеле с помощью моделирования эквивалентного кабеля и анализа токов, напряжений и спектров импеданса в местах повреждения.

Так был разработан метод обнаружения повреждений на основе модели дуги, в котором используется анализ сходства сигналов напряжения в сочетании с кросс-корреляционной функцией (ККФ) и аппроксимацией синусоидальной кривой. Этот двухэтапный подход позволяет обнаруживать зарождающиеся неисправности и при этом эффективно отличать переключение конденсаторов, изменения нагрузки и другие подобные явления. Предложенный метод обеспечивает точность обнаружения, превышающую 98 %, при различных моделях дуговых замыканий.

Чжан и соавторы [6] создали электрическую модель, учитывающую эффекты электромагнитной связи между несколькими проводниками и интеграцию фотоэлектрических элементов (ФЭ). Они предложили метод определения поврежденного участка на основе различий в амплитуде и полярности тока в заземляющем проводе (ЗП) на стороне источника. Этот подход обеспечивает точность определения, приближающуюся к 100 %, и практически не зависит от трехфазного дисбаланса, погрешностей измерений или изменений параметров кабеля.

Методы выявления неисправности на линии не устраняют последствия, а лишь говорят о ее присутствии. Кабельные линии имеют протяженность от нескольких метров до десятков километров, а критические повреждения зачастую имеют локальный характер. Метод бегущих волн – один из самых распространенных способов измерения расстояния. В последнее время появилось множество усовершенствований, предложенных различными исследователями.

Дэн и др. [7] представили новую модель бегущей волны в трехмерном подпространстве, которая устанавливает прямую связь между местом повреждения и полным набором характеристик сигнала на основе однополюсных измерений. Этот подход поддерживает алгоритм определения местоположения разломов на основе однонаправленных бегущих волн. Рабочий процесс алгоритма, состоит из двух этапов: офлайн- и онлайн-обработки.

Резаи и др. [8] предложили альтернативный алгоритм определения местоположения разломов на основе однонаправленных бегущих волн, который определяет время прихода волн с помощью углового анализа подобранных линейных сегментов. При моделировании различных сценариев повреждения абсолютная погрешность не превышает 0,086. Предложенный алгоритм демонстрирует высокую производительность при малых углах начала повреждения. Двусторонняя технология определения местоположения с помощью бегущей волны менее чувствительна к условиям эксплуатации системы и, следовательно, обеспечивает более надежные результаты определения местоположения, чем однонаправленные подходы. В оптимизированном двунаправленном методе определения местоположения с помощью бегущей волны используется дискретное вейвлет-преобразование (DWT) для обнаружения преходящих фронтов бегущей волны. Эта модель, протестированная на различных неисправностях, демонстрирует быстрое обнаружение и локализацию неисправностей в течение 0,01 с.

Применение методов обработки сигналов для фильтрации, шумоподавления и выделения признаков данных о неисправностях может повысить точность определения характеристик неисправности для точного определения места повреждения. Хасанванд и соавторы [9] сравнили точность определения места повреждения с помощью S-преобразования и непрерывного вейвлет-преобразования (НВП) в гибридных распределительных сетях, состоящих из воздушных и кабельных линий. Результаты моделирования показали, что S-преобразование обеспечивает более высокую точность частотного разрешения и большую надежность при определении места повреждения.

Чен и соавторы [10] использовали эмпирическое вейвлет-преобразование (Empirical Wavelet Transform, EWT) в сочетании с многомасштабным разложением по сингулярным числам (Multi-Resolution Singular Value Decomposition, MRSVD) для шумоподавления бегущих волн тока в земной коре. Они определяли участок с повреждением с помощью мгновенного анализа полярности обнаруженных бегущих волн в каждой точке измерения. Однако этот метод в значительной степени зависит от высокочастотных трансформаторов тока (ВЧТ), что требует значительных первоначальных инвестиций.

Сифуэнтес и соавторы [11] использовали автономную систему для выявления переходных среднечастотных откликов систем с неисправностями, а затем определяли место неисправности в онлайн-системах с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ). При использовании этого метода погрешность определения местоположения не превышала 3,3 % при различных сценариях моделирования.

Сонг и соавторы [12] применили численное преобразование Лапласа (ЧПЛ) для установления двунаправленной эквивалентности между аналитическими решениями в частотной области и переходными процессами во

временной области. Это позволило включить в анализ реальные компоненты комплексных частот, что дало возможность точно рассчитать распределение напряжения вдоль кабелей для определения места повреждения. Максимальная погрешность определения места повреждения в ходе моделирования составила 0,6%, что свидетельствует о высокой точности позиционирования. Исследования по определению местоположения повреждений во временной области по-прежнему немногочисленны.

В качестве примера можно привести работу Бретаса и др. [13], которые разработали системную модель во временной области для однофазных повреждений на ранней стадии в подземных экранированных кабелях. Они преобразовали задачу в систему линейных уравнений, решаемых с помощью метода неотрицательных взвешенных наименьших квадратов (NNWLSE), для определения неизвестных параметров и оценки расстояния до повреждения.

Вышеупомянутые источники представляют собой устоявшиеся методологии определения места повреждения. Они отличаются простотой реализации и эксплуатации, а многие подходы уже применяются в проектировании энергосистем [14]. В этих методах обычно используется обработка сигналов для подготовки выборочных сигналов или расчеты на основе моделирования, что позволяет значительно снизить затраты на внедрение и требования к техническому обслуживанию, что в совокупности способствует их применению в инженерной практике.

С ростом масштабов электросетей сложные распределительные сети становятся все более разветвленными и имеют запутанную топологию, что значительно усложняет их точное моделирование [15]. Традиционные методы с трудом позволяют точно определить параметры линий и их электрические свойства, отражающие реальные условия, что приводит к ошибкам при обнаружении и определении местоположения неисправностей.

Интеграция распределенных источников энергии усугубляет неопределенность и нелинейность данных. Традиционные методы сталкиваются с трудностями при извлечении характеристик дефектов из данных мониторинга, содержащих большое количество гармоник и флуктуаций, что снижает точность определения местоположения.

Кроме того, из-за огромного объема данных в крупных энергосистемах вычислительная мощность традиционных методов может оказаться недостаточной для удовлетворения требований к работе в режиме реального времени, что увеличивает время определения местоположения дефектов.

Традиционные подходы часто основаны на конкретных допущениях и условиях и плохо адаптируются к изменениям в структуре энергосистемы или режимах работы. По мере расширения энергосистемы и интеграции распределенной энергетики сценарии работы становятся все более сложными и динамичными.

Эти методы могут с трудом адаптироваться к новым условиям или требовать ручной перекалибровки, что существенно снижает их универсальность.

Вышеупомянутые ограничения в основном влияют на точность обнаружения и локализации неисправностей, вычислительную эффективность и надежность, что требует дальнейших улучшений [16].

С ростом потребности в данных в энергосистемах требования к эффективности их обработки и анализа становятся все более высокими, что приводит к применению ряда алгоритмов машинного обучения в методах обнаружения и локализации повреждений кабеля.

Список использованных источников

1. Gataullin, A.M. Software and Hardware System of Monitoring High-Voltage Electric Equipment Based on the Analysis of Partial Discharge Characteristics / A.M. Gataullin, D.F. Gubaev, R.V. Gataullina // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) : Proceedings, Sochi, 15–19 мая 2023 года. – Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2023. – P. 171-176. – DOI 10.1109/UralCon59258.2023.10291128. – EDN TBYHZP.
2. Гатауллин, А.М. Комплексный метод оценки характера повреждений, их локализации и прогнозирования разрушения изоляторов высоковольтного электрооборудования по характеристикам частичных разрядов / А.М. Гатауллин, Д.Ф. Губаев // Проблемы региональной энергетики. – 2022. – № 1(53). – С. 152-160. – DOI 10.52254/1857-0070.2022.1-53.12. – EDN CYXKAF.
3. Hassan, H.A.A.; Grainger, B.M.; McDermott, T.E.; Reed, G.F. Fault location identification of a hybrid HVDC-VSC system containing cable and overhead line segments using transient data. In Proceedings of the 2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), Dallas, TX, USA, 3–5 May 2016; pp. 1–5.
4. Rajpoot, S.C.; Pandey, C.; Rajpoot, P.S.; Singhai, S.K.; Sethy, P.K. A Dynamic-SUGPDS Model for Faults Detection and Isolation of Underground Power Cable Based on Detection and Isolation Algorithm and Smart Sensors. J. Electr. Eng. Technol. 2021, 16, 1799–1819.
5. Peng, N.; Liu, X.; Liang, R.; Tang, Z.; Ren, X.; Hu, Y.; Li, G. Edge Computing Based Fault Sensing of the Distribution Cables Based on Time-Domain Analysis of Grounding Line Current Signals. IEEE Trans. Power Deliv. 2022, 37, 4404–4417.
6. Zhang, P.; Jin, M.; Liang, R.; Tang, Z.; Hou, M.; Peng, N.; Li, J. Faulty Cable Segment Identification of Low-Resistance Grounded Active Distributions via Grounding Wire Current-Based Approach. IEEE Trans. Ind. Inform. 2024, 20, 7708–7718.
7. Deng, F.; Zeng, X.; Tang, X.; Li, Z.; Zu, Y.; Mei, L. Travelling-wave-based fault location algorithm for hybrid transmission lines using three-dimensional absolute grey incidence degree. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 2020, 114, 105306.
8. Rezaei, D.; Gholipour, M.; Parvaresh, F. A single-ended traveling-wave-based fault location for a hybrid transmission line using detected arrival times and TW's polarity. Electr. Power Syst. Res. 2022, 210, 108058.
9. Hasanvand, H.; Parastar, A.; Arshadi, B.; Zamani, M.R.; Bordbar, A.S. A comparison between S-transform and CWT for fault location in combined overhead line and cable distribution networks. In Proceedings of the 2016 21st Conference on Electrical

Power Distribution Networks Conference (EPDC), Karaj, Iran, 26–27 April 2016; pp. 70–74.

10. Haohao, C.; Jing, L.; Ping, C. Design of fault location algorithm based on online distributed travelling wave for HV power cable. PLoS ONE 2024, 19, e0296513.

11. Cifuentes, N.; Pal, B.C. A New Approach to the Fault Location Problem: Using the Fault's Transient Intermediate Frequency Response. IEEE Open Access J. Power Energy 2021, 8, 510–521.

12. Song, G.; Yan, J.; Chang, Z.; Zhang, C.; Gao, X. A Frequency-Domain Fault Location Method for Underground Cables in MMC-HVdc Systems. IEEE Trans. Instrum. Meas. 2024, 73, 1–12.

13. Bretas, A.S.; Herrera-Orozco, A.R.; Orozco-Henao, C.A.; Iurinic, L.U.; Mora-Flórez, J. Incipient fault location method for distribution networks with underground shielded cables: A system identification approach. Int. Trans. Electr. Energy Syst. 2017, 27, e2465.

14. Gataullin, A. M. Automation of high-voltage electrical equipment insulators diagnostics by partial discharges method / A. M. Gataullin, D. F. Gubaev, R. R. Khusnutdinov // Proceedings – 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021, Sochi, 17–21 мая 2021 года. – Sochi, 2021. – P. 58–62. – DOI 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446304. – EDN HMPASI.

15. Gataullin, A. M. Development of method for high-voltage electrical equipment insulators monitoring in UHF range of electromagnetic radiation / A. M. Gataullin // Proceedings – 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020, Sochi, 18–22 мая 2020 года. – Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. – P. 9112023. – DOI 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112023. – EDN YCLTNE.

16. Gataullin, A. M. Insulators electrical strength estimation under AC applied voltage / A. M. Gataullin // Proceedings – 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2019, Chelyabinsk, 01–03 октября 2019 года. – Chelyabinsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 35–39. – DOI 10.1109/URALCON.2019.8877654. – EDN ASVGCE.

TRENDS IN THE TRANSITION TO MACHINE LEARNING IN THE FIELD OF DETECTION AND LOCALIZATION OF CABLE DAMAGE

M.D. Yelfutin, I.I. Zinnatullin

*Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia*

This paper presents the main causes of cable damage and traditional approaches to detecting and localizing damage. The advantages and disadvantages of traditional methods are analyzed to determine the trend of optimizing the power system structure and accelerating the creation of a new type of power system by implementing machine learning.

Keywords: *cable line damage detection and localization, machine learning, traditional methods of damage detection and localization, traveling wave.*

РАЗРАБОТКА ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ УЧЁТА РЕЗУЛЬТАТОВ КОНТРОЛЯ В ЛАБОРАТОРИИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

И.С. Ермилова, А.С. Юсупова

*Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия*

В статье рассмотрено проектирование и разработка веб-приложения для автоматизации учёта результатов радиографического контроля сварных соединений. Представлена реляционная модель данных (PostgreSQL), архитектура на платформе Node.js с фреймворком Express и клиентской частью на HTML/CSS/JavaScript. Реализован модуль импорта исторических данных из Excel (библиотеки multer и exceljs). Практическая значимость – создание легковесного прототипа для развёртывания в локальной сети лаборатории.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, радиографический контроль, информационная система, проектирование базы данных, веб-приложение, PostgreSQL, Node.js, Express, REST API, импорт Excel.

Современные нормативные документы требуют, чтобы порядок регистрации результатов неразрушающего контроля (НК) позволял однозначно установить проконтролированные объекты, использованные виды (методы), объёмы и средства контроля, браковочные критерии, сведения о персонале, проводившем контроль и выдавшем заключение, а также дату и место проведения работ [1]. Вместе с тем на практике во многих лабораториях учёт по-прежнему ведётся с помощью разрозненных электронных таблиц и файлов, хранящихся на сетевых дисках. Подобный подход создаёт высокую вероятность ошибок при ручном переносе данных, замедляет поиск информации и затрудняет подготовку отчётности. В связи с этим была поставлена задача разработать простое в развёртывании и сопровождении веб-приложение, которое обеспечивает централизованное хранение сведений о заказах и результатах радиографического контроля, не требуя внедрения сложных корпоративных информационных систем.

Анализ деятельности лаборатории неразрушающего контроля позволил выявить типичные проблемы организации информационных потоков. Текущий процесс управления заказами и учёта результатов характеризуется следующими особенностями: заявки от организаций-заказчиков поступают ответственному специалисту по электронной почте; вся информация о заказе, результатах контроля и назначенных исполнителях фиксируется в электронных таблицах Microsoft Excel; после выполнения работ итоговые данные сохраняются в виде файлов на сетевом ресурсе. Подобная децентрализация приводит к высокой вероятности ошибок при ручном переносе данных, значительным временным затратам на поиск архивной информации и трудностям при формировании сводной отчётности. В этих условиях очевидна потребность в инструменте, который централизует хранение

данных и упростит доступ к реестру результатов контроля, не усложняя при этом существующие бизнес-процессы.

Цель работы – разработать и внедрить прототип информационной системы, обеспечивающей централизованное хранение данных об объектах контроля и заказах, автоматизацию учёта результатов радиографического контроля (РК) сварных соединений и формирование аналитической отчётности.

В настоящее время на рынке представлено несколько классов программных продуктов, решающих задачу управления лабораторной информацией. Наиболее комплексными являются LIMS-системы, например, облачная платформа «Цифра. Лаборатория качества» или отраслевое решение «1С:Управление лабораторией» [5, 3]. Однако их внедрение в небольших лабораториях сопряжено с высокой стоимостью и избыточностью функционала. Специализированные же продукты для НК, такие как программный комплекс для оценки компетенции персонала, сфокусированы на узких задачах и не решают проблему комплексного учёта результатов контроля и управления заказами [6]. С учётом выявленной специфики была поставлена задача разработки собственного веб-приложения, отвечающего требованиям централизации данных, разграничения прав доступа и управления жизненным циклом заказа.

Для хранения структурированной информации спроектирована реляционная база данных под управлением СУБД PostgreSQL. Выбор данной СУБД обусловлен её надёжностью, поддержкой сложных запросов и возможностью бесплатного использования. Логическая схема базы данных разработана с учётом ролевой модели пользователей (Директор, Бригада) и включает следующие основные сущности: users (пользователи), brigades (бригады), organizations (организации заказчики), requests (заявки на контроль), request_assignments (назначения бригад), welded_joints (сварные соединения), control_results (результаты контроля), files (файлы), send_logs (логи отправок). Предложенная структура позволяет отслеживать полный жизненный цикл заказа, распределять нагрузку между бригадами и обеспечивать прозрачность учёта результатов контроля [4].

Разрабатываемая информационная система предназначена для работы в пределах локальной вычислительной сети лаборатории. Серверная часть приложения реализована на платформе Node.js с использованием фреймворка Express. Взаимодействие с базой данных PostgreSQL осуществляется через библиотеку node-postgres (pg) с прямым выполнением SQL-запросов. Клиентская часть представляет собой одностраничное приложение (SPA) на HTML, CSS и JavaScript, взаимодействующее с сервером посредством REST API., что обеспечивает абстракцию от конкретной СУБД.

В текущей версии прототипа аналитические функции ограничены отображением данных в табличном виде. В перспективе планируется подключение BI-инструментов, таких как Yandex DataLens, для визуализации статистики. Это решение позволяет отказаться от разработки собственного сложного модуля аналитики. Сервис предоставляет одно бес-

платное рабочее место, что достаточно для директора лаборатории, и имеет встроенный коннектор для прямого подключения к базе данных PostgreSQL [7]. Дашборды в DataLens формируются на основе датасетов, созданных из таблиц базы данных, и позволяют в реальном времени отслеживать процент брака по организациям, загруженность бригад и динамику поступления заказов.

Функциональные возможности текущей версии прототипа реализованы в виде единого административного веб-интерфейса, предназначенного для сотрудника, ответственного за ведение реестра результатов контроля. Основными доступными операциями являются: просмотр сводной таблицы с результатами контроля, содержащей информацию об организациях-заказчиках, номерах заявок, сварных соединениях, выявленных дефектах и статусах; фильтрация и сортировка записей; а также импорт исторических данных из Excel-файлов. Модуль импорта реализован на платформе Node.js с использованием библиотек *multer* для обработки загружаемых файлов и *exceljs* для парсинга содержимого. Прямой доступ к системе для членов бригад и представителей заказчиков не предусмотрен, что исключает риск несанкционированного изменения данных. Взаимодействие с бригадами и передача информации о назначенных заказах на данном этапе осуществляются вне системы с использованием стандартных каналов коммуникации лаборатории. В перспективе планируется расширение функциональности за счёт внедрения ролевой модели, автоматической генерации токенов для отслеживания устранения дефектов и подключения средств аналитической визуализации.

Предлагаемое решение является примером реализации подхода, ориентированного на конкретную прикладную задачу. В отличие от универсальных LIMS-систем, разработанный прототип имеет существенно меньшую стоимость владения, простоту развёртывания на локальном сервере, а также интерфейс, адаптированный под ролевую модель «Директор – Бригада». Использование открытого и бесплатного программного обеспечения соответствует современным тенденциям импортозамещения. Перспективными направлениями развития системы являются интеграция с модулями компьютерного зрения для автоматизированного распознавания дефектов по оцифрованным снимкам и расширение функционала личного кабинета заказчика.

Таким образом, в статье представлены результаты проектирования и начального этапа разработки веб-приложения для автоматизации учёта результатов радиографического контроля. Спроектирована реляционная модель данных, учитывающая ролевую структуру лаборатории и полный жизненный цикл заказа. Обоснован выбор технологического стека, определены ключевые функциональные модули. Разработанное решение обеспечивает выполнение нормативных требований к регистрации результатов НК, централизацию хранения данных и упрощение формирования аналитической отчётности. Но на апрель 2026 года данный проект находится в разработке. Условия и их реализация может измениться.

Список использованных источников

1. СДАНК-01-2020. Правила аттестации и основные требования к лабораториям неразрушающего контроля (приняты Решением Наблюдательного совета Единой системы оценки соответствия в области промышленной, экологической безопасности, безопасности в энергетике и строительстве от 29.12.2020 № 99-БНС; ред. от 09.02.2021). – URL: <https://legalacts.ru/doc/sdank-01-2020-pravila-attestatsii-i-osnovnye-trebovaniya-k-laboratorijam-nerazrushaiushchego/> (дата обращения: 11.04.2026).
2. Абабков, Н.В. Разработка алгоритмического обеспечения системы подготовки принятия решения при оценке работоспособности и продлении ресурса оборудования технических устройств опасных производственных объектов / Н.В. Абабков, А.С. Телегуз, М.В. Пимонов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2024. – № 3. – С. 88-98.
3. Выпущено новое решение 1С для управления лабораториями в крупных компаниях и холдингах // VC.RU. – 12.07.2024. – URL: <https://vc.ru/dev/1302200-vypusheno-novoe-reshenie-1s-dlya-upravleniya-laboratoriyami-v-krupnyh-kompaniyah-i-holdingah> (дата обращения: 08.04.2026).
4. Кузяков, Н.А. Разработка и внедрение программного обеспечения для учета результатов неразрушающего контроля в лаборатории / Н.А. Кузяков, С.В. Сенкевич, А.С. Крылов // Science and Education. – 2024. – URL: <https://sciencen.org/o/article/> (дата обращения: 08.04.2026).
5. «Цифра» представила облачную систему управления лабораторной информацией // TAdviser. – 07.10.2024. – URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Продукт:Цифра._Лаборатория_качества (дата обращения: 08.04.2026).
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Автоматизированная система оценки компетентности персонала неразрушающего контроля» // Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 2025. – URL: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2025661234&TypeFile=html (дата обращения: 08.04.2026).
7. Тарифы Yandex DataLens // Yandex Cloud. – URL: <https://cloud.yandex.ru/docs/datalens/pricing> (дата обращения: 08.04.2026).
8. Чесалов, А.Ю. Методологический подход к цифровой трансформации предприятий отрасли производителей оборудования неразрушающего контроля / А.Ю. Чесалов, Б.В. Палюх // Habr. – 05.04.2025. – URL: <https://habr.com/ru/articles/897744/> (дата обращения: 08.04.2026).

DEVELOPMENT OF AN APPLICATION FOR RECORDING INSPECTION RESULTS IN A NON-DESTRUCTIVE TESTING LABORATORY

I.S. Ermilova, A.S. Yusupova

*Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia*

The article discusses the design and development of a web application for automating the recording of radiographic inspection results of welded joints. A relational data model (PostgreSQL) is presented, along with the application architecture based on the Node.js platform with the Express framework and a client side implemented in HTML,

CSS, and JavaScript. A module for importing historical data from Excel files has been implemented using the *multer* and *exceljs* libraries. The practical significance of the work lies in the creation of a lightweight prototype ready for deployment in a laboratory's local network.

Keywords: *non-destructive testing, radiographic testing, information system, database design, web application, PostgreSQL, Node.js, Express, REST API, Excel import.*

УДК 658.382:621.31

УПРАВЛЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

К.А. Ермохина, Р.Н. Пигилова

*Казанский Государственный Энергетический университет,
г. Казань, Россия*

В статье рассматриваются современные подходы к управлению безопасностью технологических процессов на предприятиях энергетической отрасли. Анализируются основные опасные факторы, сопровождающие эксплуатацию энергетического оборудования, а также нормативно-правовая база в области охраны труда. Особое внимание уделяется риск-ориентированному подходу как центральному элементу современных систем управления безопасностью. Рассматриваются вопросы цифровизации процессов контроля безопасности, внедрения систем мониторинга состояния персонала и оборудования, а также роль наставничества в формировании культуры безопасности. На основе анализа актуальных проблем предлагаются направления совершенствования системы управления безопасностью технологических процессов.

Ключевые слова: *управление безопасностью, технологические процессы, энергетические предприятия, профессиональные риски, охрана труда, культура безопасности, цифровизация, риск-ориентированный подход.*

Энергетический комплекс является фундаментом экономики любой страны, однако его функционирование сопряжено с наличием многочисленных опасных и вредных производственных факторов. Обеспечение безопасных условий труда на объектах энергетического хозяйства – это не только обязательное требование законодательства, но и ключевой элемент бесперебойного и надежного энергоснабжения [1].

Основные опасные факторы в энергетике. Основная опасность в энергетике связана с эксплуатацией электроустановок. К опасным факторам относятся: поражение электрическим током, воздействие электрической дуги, электромагнитных полей, пожаровзрывоопасность оборудования, работа на высоте, неблагоприятные микроклиматические условия. Согласно Правилам по охране труда при эксплуатации электроустановок, к работам допускаются лица не моложе 18 лет, прошедшие специальное обучение, проверку знаний и имеющие соответствующую группу по электробезопасности [1].

Современные требования к управлению безопасностью в российской энергетике формируются под влиянием трех ключевых факторов: нормативно-правовой эволюции, изменения структуры угроз и технологической модернизации [2]. В соответствии с Доктриной энергетической безопасности Российской Федерации, утвержденной Указом Президента, энергетическая безопасность определяется как состояние защищенности экономики и населения страны от угроз национальной безопасности в сфере энергетики.

Несмотря на строгие требования, ключевыми проблемами остаются физический и моральный износ оборудования, несовершенство средств защиты, человеческий фактор и организационные недостатки. Значительная часть основных фондов в энергетике эксплуатируется за пределами проектного ресурса, что повышает риск аварийных ситуаций.

Риск-ориентированный подход в управлении безопасностью. Современная парадигма управления безопасностью смещается от следования формальным предписаниям к активному управлению профессиональными рисками. Оценка профессиональных рисков становится центральным элементом системы управления охраной труда [3].

Риск-ориентированный подход базируется на моделях анализа и прогноза технического состояния объектов, входящих в состав энергетической системы, анализа техногенного риска эксплуатации, выбора объектов и методов ремонта, оптимизации планирования и оценки эффективности. На основе оценки технического состояния рассматриваемых объектов и анализа риска рассчитываются показатели их надежности и прогнозируются последствия отказов.

С 2025 года в России вступил в силу ряд изменений в области охраны труда, касающихся особенностей оценки условий труда для различных профессиональных групп. Расширены полномочия государственных инспекторов труда, которые получили право проверять не только работодателей, но и организации, проводящие специальную оценку условий труда [4].

Цифровизация процессов управления безопасностью. Цифровизация предоставляет мощные инструменты для повышения уровня безопасности. К ним относятся создание цифровых двойников энергетических объектов, позволяющих моделировать аварийные ситуации и отрабатывать алгоритмы действий без риска для персонала; использование систем дополненной реальности (AR) для проведения инструктажей и идентификации опасностей непосредственно на рабочем месте; мониторинг состояния персонала с помощью носимых устройств, контролирующих показатели усталости, стресса и нахождения в опасной зоне [4].

Автоматизированные системы контроля (АСКУЭ, АСТУЭ) и центры ситуационного реагирования позволяют осуществлять превентивный мониторинг угроз, что является ключевым элементом современной системы безопасности [5,6].

Роль наставничества и обучения персонала. С введением в Трудовой кодекс РФ понятия «наставничество в сфере труда» (Федеральный закон от 09.11.2024 № 381-ФЗ) эта деятельность получает официальный статус, требующий системной организации. Эффективная система наставничества

позволяет сократить период адаптации новых сотрудников, снизить количество ошибок, сформировать устойчивые навыки безопасного поведения.

Современная система обучения должна быть многоуровневой, непрерывной и практико-ориентированной. Целью является не просто выдача удостоверения, а формирование у персонала устойчивых компетенций, позволяющих принимать верные решения в стандартных и нестандартных ситуациях.

Управление безопасностью технологических процессов на энергетических предприятиях представляет собой комплексную задачу, требующую системного подхода. Основными направлениями совершенствования являются внедрение риск-ориентированного подхода, цифровизация процессов контроля безопасности, развитие систем обучения и наставничества. Только сочетание этих элементов позволяет создать эффективную систему управления безопасностью, обеспечивающую защиту персонала и бесперебойное функционирование энергетических объектов.

Список использованных источников

1. Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок (утв. Приказом Минтруда России от 15.12.2020 № 903н, ред. от 2024 г.). – URL: <https://mintrud.gov.ru> (дата обращения: 08.05.2026).

2. Доктрина энергетической безопасности Российской Федерации (утв. Указом Президента РФ от 13.05.2019 № 216). – URL: <http://pravo.gov.ru> (дата обращения: 08.05.2026).

3. Постановление Правительства РФ от 24.12.2021 № 2464 «О порядке обучения по охране труда и проверки знания требований охраны труда» (ред. от 2025 г.). – URL: <http://pravo.gov.ru> (дата обращения: 08.05.2026).

4. Локтионов О.А., Боровкова А.М., Королев И.В. Оценка рисков в технологической безопасности: учебное пособие для студентов по направлению «Электроэнергетика и электротехника». – Москва: Издательство МЭИ, 2025. – 48 с. – ISBN 978-5-7046-3139-2.

5. Семенчук А.О., Пигилова Р.Н. Автоматизация процессов производства: риски и профилактика безопасности // Наука, образование, производство для противодействия техногенным угрозам и решения экологических проблем (Техносферная безопасность-2023): Материалы XX Международной научно-практической конференции, Уфа, 30–31 мая 2023 года. – Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2023. – С. 63–67. – EDN RNDHIU.

6. Пигилова, Р.Н. Автоматизированные системы для организации и управления системой энергообеспечения // Компетентность. – 2023. – № 3. – С. 44–49. – DOI 10.24412/1993-8780-2023-3-44-49. – EDN BOEPUD.

MANAGEMENT OF TECHNOLOGICAL PROCESS SAFETY AT ENERGY ENTERPRISES

K.A. Ermokhina, R.N. Pigilova

*Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia*

This article examines modern approaches to process safety management at energy companies. It analyzes the key hazards associated with the operation of power equipment, as well as the regulatory framework for occupational safety. Particular attention

is paid to a risk-based approach as a central element of modern safety management systems. It also considers the digitalization of safety control processes, the implementation of personnel and equipment monitoring systems, and the role of mentoring in fostering a safety culture. Based on an analysis of current issues, it proposes areas for improving process safety management systems.

Keywords: *safety management, technological processes, energy enterprises, occupational risks, occupational safety, safety culture, digitalization, risk-based approach.*

УДК 371.6

ОЦЕНКА ОСВЕЩЁННОСТИ УЧЕБНЫХ АУДИТОРИЙ И ЕЁ ВЛИЯНИЕ НА БЕЗОПАСНОСТЬ

Ч.И. Зарипова, Р.Н. Пигилова

*Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия*

В статье рассматривается роль освещённости как одного из ключевых факторов безопасности и комфорта образовательной среды. Анализируются нормативные требования к искусственному освещению учебных аудиторий (300–500 лк) и типичные отклонения от них, вызванные низким качеством светильников, загрязнением, отсутствием своевременного обслуживания. Показано, что недостаточный уровень освещения приводит к зрительному утомлению, снижению внимания, росту ошибок и потенциально травмоопасным ситуациям. Отмечается, что визуально помещение может казаться светлым, тогда как фактические значения освещённости составляют лишь 60–80 % от нормы. Делается вывод о необходимости объективных измерений и регулярного контроля освещения как значимого элемента безопасности учебного процесса.

Ключевые слова: *освещённость учебных аудиторий, безопасность образовательной среды, зрительное утомление, нормативные требования, искусственное освещение, качество освещения, факторы учебного процесса.*

В современных условиях образовательная среда рассматривается не только как место получения знаний, но и как пространство, влияющее на состояние человека. Среди множества факторов, формирующих эту среду, освещённость занимает особое место. Она незаметна на первый взгляд, но именно через неё обеспечивается нормальное восприятие информации, формируется уровень комфорта и во многом определяется безопасность учебного процесса.

Зрительное восприятие остаётся основным каналом получения информации. В аудитории студент постоянно работает с текстами, конспектами, презентациями, экраном компьютера. При этом глаза находятся в состоянии непрерывной нагрузки. Было показано, что при недостаточном освещении эта нагрузка возрастает, что приводит к быстрому утомлению и снижению внимания [4].

Учебные аудитории представляют собой пространство длительного пребывания. В течение дня занятия могут занимать несколько часов под-

ряд, и всё это время освещение должно оставаться на уровне, обеспечивающем комфортную работу. Нормативные документы устанавливают конкретные требования: освещённость рабочих поверхностей должна находиться в пределах 300–500 лк, а для отдельных зон – не ниже 500 лк [1]. Эти значения сформированы с учётом физиологических особенностей зрения и направлены на снижение утомляемости.

Несмотря на это, фактические условия в аудиториях нередко оказываются далеки от нормативных. Анализ показывает, что проблема заключается не столько в отсутствии освещения, сколько в его качестве. Используются лампы с недостаточным световым потоком, часть светильников работает не полностью, отсутствуют рассеиватели, а сами поверхности светильников загрязнены [1]. Всё это приводит к снижению уровня освещённости, хотя визуально помещение может казаться достаточно светлым.

Подобная ситуация создаёт скрытую нагрузку на зрение. Глаза вынуждены постоянно адаптироваться, усиливается напряжение, которое со временем приводит к утомлению. При этом человек не всегда сразу замечает ухудшение условий. Постепенное снижение освещённости воспринимается как привычное состояние, хотя фактически оно не соответствует нормам.

С точки зрения безопасности это имеет принципиальное значение. Снижение освещённости влияет на точность зрительного восприятия, а значит – на способность быстро и правильно реагировать на происходящее. В условиях учебных аудиторий это может проявляться в виде ошибок при выполнении заданий, пропусков важной информации, ухудшения координации действий [3].

Особенно это актуально для помещений, где используется оборудование или выполняются практические работы. Недостаток света увеличивает вероятность неправильных действий, а снижение концентрации внимания может привести к травмоопасным ситуациям. Вследствие этого освещённость становится одним из факторов, напрямую связанных с безопасностью образовательной среды.

Кроме физиологического воздействия, освещение оказывает влияние и на психологическое состояние. Слабый или неравномерный свет делает пространство менее комфортным, вызывает ощущение напряжения и усталости. Напротив, равномерное и достаточное освещение способствует более спокойной и сосредоточенной работе. Это особенно важно в условиях интенсивного учебного процесса.

Отдельного внимания заслуживает вопрос соответствия освещения нормативным требованиям. Было установлено, что даже при правильном расположении светильников их эффективность может снижаться из-за несоответствия технических характеристик. Например, использование ламп с недостаточной мощностью не позволяет достичь требуемого уровня освещённости, даже если их количество соответствует расчётам [1].

Дополнительным фактором является отсутствие регулярного обслуживания. Пыль и загрязнения на светильниках уменьшают световой поток, а перегоревшие лампы не всегда своевременно заменяются. В результате освещение постепенно ухудшается, но этот процесс остаётся незаметным.

Интересно, что разница между нормативной и фактической освещённостью может достигать значительных величин. В ряде случаев она составляет лишь 60–80% от требуемого уровня. При этом визуальное помещение может восприниматься как достаточно освещённое, что создаёт ложное ощущение соответствия нормам.

Освещённость в данном контексте выступает не просто характеристикой помещения, а важным элементом учебной среды. Она влияет на работоспособность, точность выполнения заданий и общее состояние студентов. Это позволяет рассматривать её как один из факторов, определяющих качество и безопасность образовательного процесса.

Следовательно, оценка освещённости должна основываться не на субъективных ощущениях, а на объективных измерениях и сравнении с установленными нормативами [2]. Только такой подход позволяет выявить реальные отклонения и оценить их влияние.

В итоге становится очевидно, что освещение играет гораздо более важную роль, чем может показаться на первый взгляд. Оно формирует условия, в которых проходит обучение, и напрямую влияет на состояние студентов. Недостаток света не всегда заметен сразу, но его последствия проявляются постепенно – в виде усталости, снижения внимания и увеличения количества ошибок.

Вследствие этого освещённость учебных аудиторий следует рассматривать как значимый фактор безопасности, требующий постоянного контроля и анализа.

Список использованных источников

1. СанПиН ПМР 2.4.3.1186-07 «Санитарно-гигиенические требования к организации учебно-производственного процесса в организациях начального и среднего профессионального образования». – Тирасполь, 2007. – 48 с.
2. СанПиН МЗ и СЗ ПМР 2.2.1/2.1.1.1278-12 «Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий». – Тирасполь, 2012. – 52 с.
3. СНиП 23-05-95 «Естественное и искусственное освещение». – Москва: Госстрой России, 1996. – 35 с.
4. Девисилов, В. А. Освещение и здоровье человека / В. А. Девисилов // Безопасность жизнедеятельности. – 2003. – № 7. – С. 16.

ASSESSMENT OF ILLUMINATION IN EDUCATIONAL CLASSROOMS AND ITS IMPACT ON SAFETY

Ch.I. Zaripova, R.N. Pigilova

*Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia*

The article examines the role of illumination as one of the key factors of safety and comfort in the educational environment. It analyzes the regulatory requirements for artificial lighting in educational classrooms (300–500 lux) and typical deviations from them caused by poor quality of luminaires, dirt accumulation, and lack of timely maintenance. It is shown that insufficient lighting levels lead to visual fatigue, de-

creased attention, increased errors, and potentially traumatic situations. It is noted that a room may visually appear sufficiently bright, while actual illumination values are only 60–80% of the standard. The conclusion is made about the need for objective measurements and regular monitoring of lighting as a significant element of educational process safety.

Keywords: classroom illumination, safety of the educational environment, visual fatigue, regulatory requirements, artificial lighting, lighting quality, factors of the educational process.

УДК 621.3.078

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ УПРАВЛЯЮЩЕЙ ПРОГРАММЫ НА КАЧЕСТВО ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В.В. Зиновьев, Ю.В. Истомина

*Пензенский государственный университет,
г. Пенза, Россия*

В статье исследуется взаимосвязь между режимами резания, задаваемыми в управляющей программе (подача, скорость резания, перемещение) и процессами стружкообразования при фрезерной обработке на станках с ЧПУ; приводится математическая модель, связывающая силу резания, упругие деформации технологической системы и управляющие воздействия; анализируется переходная характеристика, полученная для параметров чистовой обработки детали, изготовленной из стали 45.

Ключевые слова: фрезерный станок с ЧПУ, технологическая система, математическое моделирование, упругие деформации, управляющая программа.

В современном машиностроении предъявляются высокие требования к точности изготавливаемой продукции. При изготовлении деталей на станках с числовым программным управлением (ЧПУ) качество поверхности определяется не только жёсткостью станка и геометрией инструмента, но и параметрами управляющей программы (УП). Программист-наладчик задаёт величину подачи, скорости резания, стратегию интерполяции, однако влияние этих параметров на качество поверхности часто недооценивается. Особенно это актуально для неустановившихся режимов резания: вход в заготовку, выход из неё, обработка прерывистых поверхностей. В этих зонах сила резания резко изменяется, что вызывает упругие отжатия инструмента, а следовательно – погрешность формы детали.

Рассмотрим процесс чистового фрезерования заготовки на обрабатывающем центре модели DOOSAN DNM 5700 с системой ЧПУ FANUC Series 0i-TF. Управляющая программа содержит кадры с линейной и круговой интерполяцией. Режимы резания задаются через адреса F (подача, мм/зуб) и S (частота вращения инструмента, мин⁻¹) [1].

Фактическая глубина резания t_ϕ отличается от заданной t_z из-за упругих деформаций у технологической системы [2, 3]:

$$t_\phi = t_z - y. \quad (1)$$

Дополнительным фактором, влияющим на качество поверхности детали, является дискретность обработки кадров УП: изменение подачи не происходит мгновенно, а зависит от длительности переходных процессов, происходящих в приводе станка.

При равномерном фрезеровании цилиндрической фрезой сила резания описывается нелинейной зависимостью [3]:

$$P = \frac{2^{1-k}}{\pi(2-k)} \cdot C_p \cdot F^{1-k} \cdot \left(\frac{t_\phi}{D}\right)^{1-\frac{k}{2}} \cdot B \cdot z, \quad (2)$$

где $C_p = 250$ – эмпирический коэффициент; z – число зубьев фрезы; D – диаметр фрезы; B – ширина фрезерования; k – показатель степени; $k = 1,063$.

В линеаризованной форме, в окрестности рабочей точки, уравнение (2) принимает вид:

$$P = k_p \cdot t_\phi, \quad (3)$$

где k_p – коэффициент линеаризованной зависимости силы резания от глубины резания.

$$k_p = \left(\frac{\partial P}{\partial t_\phi}\right) = \frac{2^{1-k}}{\pi(2-k)} \cdot C_p \cdot F^{1-k} \cdot D^{\frac{k}{2}-1} \cdot \left(1 - \frac{k}{2}\right) \cdot t_\phi^{\frac{-k}{2}} \cdot B \cdot z. \quad (4)$$

Привод подачи станка с ЧПУ (серводвигатель + шарико-винтовая пара) описывается апериодическим звеном первого порядка:

$$F_{\text{зад}} = F + T_{\text{пр}} \frac{dF}{dt}, \quad (5)$$

где $T_{\text{пр}}$ – постоянная времени привода; $T_{\text{пр}} = 0,02 \dots 0,05$ с; $F_{\text{зад}}$ – заданная подача, мм/зуб; F – фактическая подача, мм/зуб.

Стол с приспособлением и заготовкой рассматриваем как систему с единой массой:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + \lambda \frac{dy}{dt} + cy = P(t), \quad (6)$$

где m – приведённая масса; c – приведённая жёсткость; λ – коэффициент демпфирования.

В работе [4] показано, что процесс обработки обладает инерционностью, что учитывается постоянной времени стружкообразования T_c :

$$T_c \frac{dP}{dt} + P = k_p \cdot t_\phi. \quad (7)$$

При малых значениях T_c для конструкционных и низколегированных сталей постоянной времени можно пренебречь, но для твёрдых и хрупких материалов, таких как высоколегированные или жаропрочные стали, она значима и обязательна при расчётах.

Чтобы учесть совместное влияние инерционности приводов, податливости узлов станка и режимов резания на отклонение фактической траек-

тории движения инструмента от программируемой, введём обобщенную метрику – эквивалентную динамическую погрешность:

$$\Delta D = \frac{1}{T} \int_0^T |y(t) - y_{уст}| \cdot dt, \quad (8)$$

где $y_{уст}$ – статическая деформация; $T = T_{пр}$; $y(t)$ – динамическая деформация.

Выполним расчёт в программе Mathcad для следующих исходных данных: материал заготовки – сталь 45 ГОСТ 1050-2013; фреза монолитная цилиндрическая – GMF60918 фирмы YG1; $m = 850$ кг; $S = 2000$ мин⁻¹; $F = 0,01$ мм/зуб; $T_{пр} = 0,03$ с; $c = 2 \cdot 10^4$ Н/мм; $z = 4$; $D = 12$ мм; $B = 20$ мм; $t_{\phi} = 0,3$ мм (ступенчатое изменение).

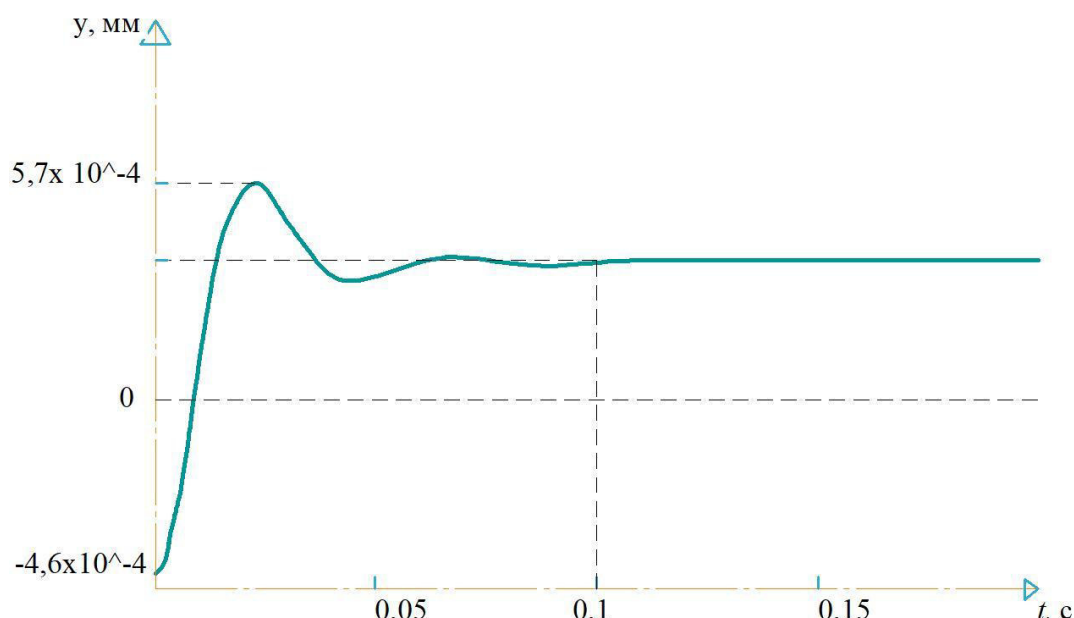


Рисунок 1 – Переходная характеристика системы

Анализ полученного переходного процесса по деформации (рисунок 1) показал, что время его затухания составило 0,1 с, динамическая деформация принимает значение 0,00057 мм, а статическая деформация равна 0,00032 мм.

Проведенное моделирование позволяет сделать выводы, что для минимизации погрешности обработки следует избегать резких изменений глубины резания в одном кадре УП, использовать команды G08/G09 перед чистовыми проходами, а также применять программное сглаживание с помощью команд G64/G05.1.

Список использованных источников

1. FANUC Series 0i – MODEL TF. Operator's Manual. – 2014. – 762 с.
2. Кудинов, В.А. Динамика станков. – М. : Машиностроение, 1967. – 359 с.
3. Петраков, Ю.В. Теория автоматического управления технологическими системами: учебное пособие для студентов вузов. [Электронный ресурс] / Ю.В. Петраков, О.И. Драчев. – Электрон. дан. – М. : Машиностроение, 2009. – 336 с.

4. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.

THE INFLUENCE OF THE CONTROL PROGRAM PARAMETERS ON THE QUALITY OF THE TREATED SURFACE

V.V. Zinovev, J.V. Istomina

*Penza State University,
Penza, Russia*

The article examines the relationship between the cutting modes specified in the control program (feed, cutting speed, movement) and the chip formation processes during CNC milling; it presents a mathematical model linking the cutting force, elastic deformations of the technological system, and control actions; the transient response obtained for the finishing parameters of a part made of 45 steel is analyzed.

Key words: CNC milling machine, technological system, mathematical modeling, elastic deformations, control program.

УДК 620.2–022.532

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ФТОРОПЛАСТОВЫХ ПОКРЫТИЙ С УНТ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ВОДОРОДОБАРЬЕРНЫХ СВОЙСТВ

В.А. Злотин, А.П. Петкова

*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
г. Санкт-Петербург, Россия*

Высокое давление водорода вызывает охрупчивание стальных труб. Для снижения водородопроницаемости необходимы защитные покрытия. В работе электрохимическим методом изучено влияние композитных фторполимерных покрытий, модифицированных УНТ на водородопроницаемость через образцы, выполненные из стали 20. Определены эффективный коэффициент диффузии и стационарный поток для стали без покрытия, с графитовым слоем и с покрытием на основе ПТФЭ с УНТ.

Ключевые слова: полимерные покрытия, проницаемость водорода, композиционные материалы, фторопласт.

На сегодняшний день в России ведётся активное обсуждение применения водорода в качестве энергетического ресурса. По сравнению с другими привычными источниками энергии водород обладает высокой энергоэффективностью и является более экологичным, так как при его сжигании образуется водяной пар, а не CO₂. Тем не менее, из-за своего малого атомного размера водород легко проникает в материалы, накапливается в дефектах кристаллической решётки, снижая механические свойства, и вызывает водородное охрупчивание при нагрузках [1]. Это вызы-

вает проблемы транспорта и хранения водорода, так как повышается риск возникновения аварий в следствии ухудшения механических свойств металла конструкций и последующим образованием трещин. Поэтому, согласно концепции развития водородной энергетики в Российской Федерации от 5 августа 2021 г. №2162-р в п. 24 (в), важным направлением является развитие отечественных технологических компетенций в области водородной энергетики с обеспечением импортозамещения и дальнейшим переходом к экспорту технологий и промышленной продукции на зарубежные рынки.

Одним из способов защиты трубопроводов от воздействия водорода является нанесение внутренних защитных покрытий, целью которых является снижение объёма попадания водорода в основной металл. Наиболее широкое применение в качестве внутретрубных покрытий является нанесение полимерных покрытий. Однако сами полимеры из-за меньшей плотности и аморфности слабо препятствуют проникновению водорода. Добавление наполнителей (оксиды металлов, графен, нанотрубки) повышает плотность сшивки полимерной сети, усложняет путь диффузии водорода и снижает его проницаемость [2].

Цель работы – оценить снижение диффузии водорода через стальную подложку при нанесении композиционного полимерного покрытия на основе фторопласта, модифицированного углеродными нанотрубками.

Подготовка образцов. Образцы из стали 20 (60×90 мм, ~3,8 мм) для испытаний без покрытия шлифовали и полировали до зеркального блеска. Для нанесения покрытий поверхность подвергали пескоструйной обработке до шероховатости Ra ~5–5,5 мкм.

Нанесение покрытий. Для снижения водородопроницаемости на сталь наносили три типа покрытий: графитовый лак (ГП) на эпоксидной основе, модифицированный ПТФЭ+ГП.

Приготовление и нанесение лакокрасочных покрытий. Использовали фторопластовую эмаль ФП-566 (растворитель – бутилацетат), модифицированную фотоинициатором Irgacure 819 для УФ-отверждения. В 40 г бутилацетата добавили 0,3 г УНТ и 0,01 г фотоинициатора, диспергировали в УЗ-ванне 20 мин, затем добавили 20 г эмали и снова обработали ультразвуком 20 мин. Покрытие наносили распылением. Сверху наносили тонкий слой графита (~5 мкм) для токопроводящего слоя при электрохимических испытаниях.

Дополнительно подготовлены образцы только с графитовым слоем (40 мкм) и с ПТФЭ+ГП для отдельной оценки вклада каждого слоя в водородопроницаемость.

Проведение испытаний. Испытания на водородопроницаемость проводили в ячейке Деванатана-Стачурски с раствором 0,1 М NaOH. Электроды – графитовые стержни, электрод сравнения – Ag/AgCl. Плотность тока наводороживания – 3,75 мА/см², рабочая площадь – 8,04 см², рабочий потенциал – 200 мВ. Схема ячейки приведена на рисунке 1.

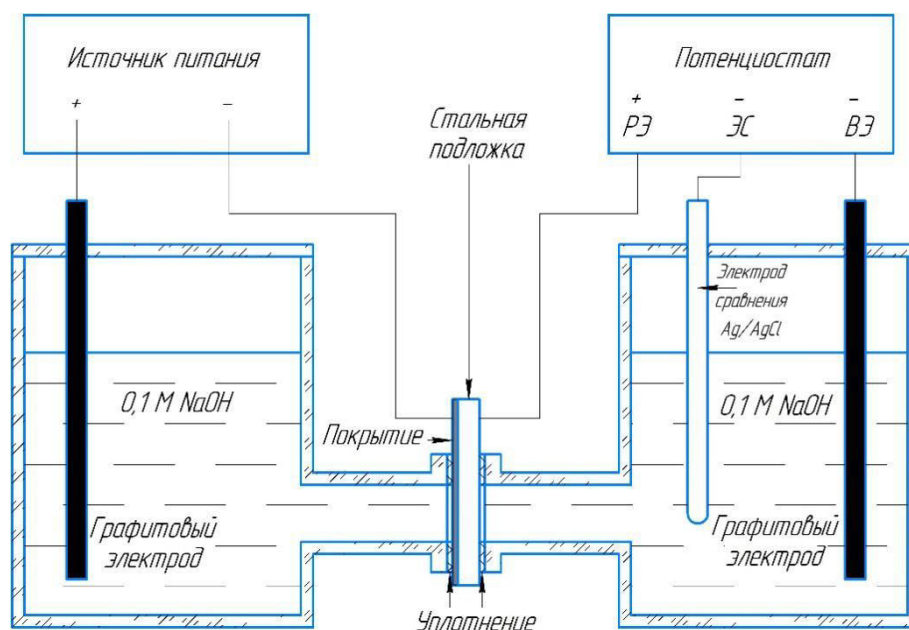


Рисунок 1 – Схема электрохимической ячейки:
РЭ – рабочий электрод; ЭС – электрод сравнения;
ВЭ – вспомогательный электрод [составлено авторами]

По измеренным значениям силы тока на рабочем электроде от времени определяют диффузионный поток $J(t)$ [моль/(с*см²)] водорода по формуле [32]:

$$J(t) = \frac{I(t)}{F \cdot S}, \quad (1)$$

где $I(t)$ – сила тока в момент времени t , А; S – площадь контакта поверхности испытуемого образца с рабочим раствором, см²; F – постоянная Фарадея, 96485 Кл/моль.

Для определения эффективного коэффициента диффузии $D_{эфф}$ [см²/с] используют следующее выражение [33-35]:

$$D_{эфф} = \frac{h^2}{6 \cdot t_{lag}}, \quad (2)$$

где h – толщина образца, см; t_{lag} – момент времени, при котором $J(t)/J(cm) = I(t)/I_{cm} = 0,63$, с (рисунок 2); I_{cm} – сила тока при стационарном режиме диффузии, А.

По экспериментальным кривым оценивался коэффициент снижения диффузии водорода DRF по формуле (3) и коэффициент снижения стационарного диффузионного потока PRF по формуле (4), которые показывают, во сколько раз диффузия снижается благодаря покрытию.

$$DRF = \frac{D_{эфф}(\delta n)}{D_{эфф}(\Pi)}; \quad (3)$$

$$PRF = \frac{J(\delta n)}{J(\Pi)}; \quad (4)$$

Результаты, полученные в ходе испытаний стального образца без покрытия и с различными покрытиями представлены в таблице 1. Толщина покрытия $h_{по}$ определялась как сумма всех слоев.

Таблица 1 – Результаты испытаний [составлено авторами]

Образец	$h_{по}$, мкм	$h_{г}$, мкм	$D_{eff} \times 10^6$, см ² /с	$J(t) \times 10^{12}$, моль/(с×см ²)	DRF	PRF
Сталь 20	-	3763	1,79	18,58	-	-
Сталь 20 + ГП	40	3803	0,591	8,89	3,03	2,09
Сталь 20 + ПТФЭ + ГП	76	3839	0,235	1,79	7,36	10,38

Графитовое покрытие толщиной 40 мкм умеренно снижает диффузию и проницаемость водорода. Эффективность по потоку ($PRF \approx 2,1$) ниже, чем по диффузии ($DRF \approx 3,0$), что может указывать на наличие дефектов или недостаточную ориентацию графитовых чешуек.

Композитное покрытие (толщина 76 мкм) значительно эффективнее. PRF (10,38) выше DRF (7,36), что говорит о хороших барьерных свойствах: покрытие не только замедляет диффузию, но и эффективно снижает поток за счёт более плотной структуры и извилистого пути для водорода.

Несовпадение DRF и PRF для ГП ($DRF > PRF$) указывает на то, что покрытие снижает диффузионную подвижность сильнее, чем стационарный поток. Это может быть связано с:

- наличием микродефектов;
- недостаточной толщиной;
- неоптимальной структурой.

Для ПТФЭ+ГП наблюдается обратное ($PRF > DRF$) – признак эффективного барьера с извилистым путём диффузии и низкой дефектностью.

Прямой корреляции с толщиной нет – ПТФЭ+ГП толще всего лишь в 1,9 раза, но эффективность по потоку выше в 5 раз. Значит, главную роль играет материал и структура покрытия, а не просто увеличение толщины.

Таким образом, фторопластовое покрытие, модифицированное углеродными нанотрубками даёт существенное снижение объём водорода, поступающего к основному металлу. Данное покрытие может рассмотрено как потенциально применимое на объектах транспорта и хранения водорода, однако требует дальнейших исследований, например, адгезионной прочности и сплошности покрытия.

Список использованных источников

1. Барьеры реализации водородных инициатив в контексте устойчивого развития глобальной энергетики / В.С. Литвиненко, П.С. Цветков, М.В. Двойников, Г.В. Буслаев // Записки Горного института. – 2020. – Т. 244. – С. 428-438. – DOI 10.31897/PMI.2020.4.5. – EDN JDOTFC.

2. Сравнительный анализ эффективности снижения проницаемости водорода посредством применения защитных покрытий при его транспортировке, хранении и производстве / А.П. Петкова, Е.И. Пряхин, В.А. Злотин, Д.В. Гареев // Дизайн. Материалы. Технология. – 2024. – № 4(76). – С. 167-174. – DOI 10.46418/1990-8997_2024_4(76)_167_174. – EDN VSNADO.

EVALUATION OF THE OF MODIFIED FLUOROPLASTIC COATINGS WITH CNT TO INCREASE THEIR HYDROGEN BARRIER PROPERTIES

V.A. Zlotin, A.P. Petkova

*St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II,
St. Petersburg, Russia*

High hydrogen pressure causes embrittlement of steel pipes. Protective coatings are needed to reduce hydrogen permeability. The effect of composite fluoropolymer coatings modified with CNTs on hydrogen permeability through samples made of steel 20 was studied electrochemically. The effective diffusion coefficient and steady-state flow for uncoated steel, graphite-coated steel, and PTFE-coated steel with CNT have been determined.

Keywords: *polymer coatings, hydrogen permeability, composite materials, fluoroplast.*

УДК 621.314.22.08

СОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ: ПРИНЦИПЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

А.А. Идиятуллин, М.Ш. Гарифуллин

*Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия*

В данной статье рассматриваются ключевые аспекты функционирования измерительных трансформаторов тока и напряжения, их роль в электроэнергетических системах и современные направления совершенствования. Основное внимание уделено принципам преобразования сигналов, факторам, влияющим на точность измерений, а также инновационным технологиям, таким как цифровые и оптические трансформаторы. Анализируются перспективы интеграции измерительных трансформаторов в интеллектуальные сети Smart Grid и системы цифровых подстанций.

Ключевые слова: *измерительные трансформаторы, трансформаторы тока, трансформаторы напряжения, точность измерений, цифровые подстанции, Smart Grid.*

Измерительные трансформаторы представляют собой важнейшие компоненты систем учета электроэнергии, релейной защиты и автоматики. Их основное назначение – преобразование высоких значений токов и напряжений в пропорционально сниженные величины, безопасные для подключения измерительных приборов и устройств управления.

С развитием энергетики и внедрением цифровых технологий традиционные электромагнитные трансформаторы постепенно дополняются и заменяются более совершенными аналогами, обладающими повышенной точностью, устойчивостью к помехам и возможностью интеграции в со-

временные системы мониторинга и управления. В данной статье рассматриваются принципы работы измерительных трансформаторов, их классификация, основные источники погрешностей и перспективные направления развития.

Принцип действия и классификация измерительных трансформаторов Трансформаторы тока

Трансформаторы тока (ТТ) предназначены для преобразования переменного тока высокого значения в ток, пропорционально уменьшенный до стандартных величин (обычно 1 А или 5 А). Они работают на принципе электромагнитной индукции: первичная обмотка, включенная последовательно в измеряемую цепь, создает магнитный поток в сердечнике, который индуцирует ток во вторичной обмотке.

Важнейшими параметрами трансформаторов тока являются:

Номинальный первичный и вторичный ток (например, 100 А / 5 А);

Класс точности (0,1; 0,2; 0,5 – для точных измерений, 1; 3 – для защиты);

Предельная кратность – максимальный ток, при котором трансформатор сохраняет заданную точность;

Нагрузка вторичной цепи (в Омах), влияющая на погрешность.

Основные погрешности ТТ связаны с неидеальностью магнитных свойств сердечника, насыщением при больших токах и влиянием внешних электромагнитных полей.

Трансформаторы напряжения

Трансформаторы напряжения (ТН) служат для понижения высокого напряжения до стандартных значений, обычно 100 В или $100/\sqrt{3}$ В. Они подключаются параллельно к измеряемой цепи и обеспечивают гальваническую развязку между высоковольтной частью и измерительными приборами.

ТН делятся на:

Электромагнитные – работают по тому же принципу, что и силовые трансформаторы;

Емкостные – используют делитель напряжения на конденсаторах;

Оптико-электронные – основаны на эффекте Поккельса или Фарадея, применяются в цифровых подстанциях.

Ключевые параметры трансформаторов напряжения включают номинальное первичное и вторичное напряжение, класс точности (0,1; 0,2; 0,5) и частотный диапазон.

Современные технологии и перспективы развития

Цифровые и оптические трансформаторы

Современные тенденции в развитии измерительных трансформаторов связаны с активным внедрением цифровых и оптических технологий, которые обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными электромагнитными аналогами.

Оптические трансформаторы тока (ОТТ) основаны на эффекте Фарадея, согласно которому плоскость поляризации света, проходящего через оптически активное вещество, находящееся в магнитном поле, поворачивается на угол, пропорциональный напряженности этого поля. В качестве

чувствительного элемента в таких трансформаторах используется специальное оптическое волокно или кристалл, помещенные в область действия магнитного поля измеряемого тока. Основное преимущество ОТТ заключается в отсутствии магнитного насыщения, что позволяет точно измерять токи в широком диапазоне – от долей ампера до сотен килоампер. Кроме того, оптические трансформаторы обладают высокой помехозащищенностью, так как сигнал передается по оптическому каналу, нечувствительному к электромагнитным наводкам.

Цифровые трансформаторы напряжения, в свою очередь, часто используют емкостные или резистивные делители в сочетании с аналого-цифровыми преобразователями. Такие устройства обеспечивают высокую точность измерений в широком частотном диапазоне, что особенно важно для современных энергосистем с высокой долей нелинейных нагрузок. Цифровые трансформаторы легко интегрируются в системы автоматизированного учета и управления, так как выдают сигнал в стандартизированном цифровом формате.

Интеграция в Smart Grid и цифровые подстанции

Развитие интеллектуальных энергосистем (Smart Grid) и цифровых подстанций предъявляет новые требования к измерительным трансформаторам. В таких системах критически важна не только точность измерений, но и возможность передачи данных в реальном времени с высокой скоростью и надежностью.

Современные измерительные трансформаторы все чаще оснащаются цифровыми интерфейсами, такими как IEC 61850, который является международным стандартом для коммуникации в энергетике. Этот протокол позволяет передавать не только мгновенные значения тока и напряжения, но и дополнительные параметры, такие как качество электроэнергии, наличие гармоник и даже диагностическую информацию о состоянии самого трансформатора.

Интеграция измерительных трансформаторов в системы Smart Grid также подразумевает их взаимодействие с интеллектуальными устройствами учета (smart meters) и системами автоматического управления. Например, данные от трансформаторов могут использоваться для оптимального распределения нагрузки, прогнозирования энергопотребления и даже для автоматического устранения аварийных ситуаций.

Измерительные трансформаторы остаются неотъемлемой частью электроэнергетических систем, но их развитие идет по пути цифровизации и повышения точности. Внедрение оптических и электронных технологий открывает новые возможности для создания более надежных и эффективных систем измерения, соответствующих требованиям современных Smart Grid и цифровых подстанций.

Список использованных источников

1. ГОСТ 7746-2015 «Трансформаторы тока. Общие технические условия». – М.: Стандартинформ, 2016. – 45 с.

2. Международный стандарт IEC 61869-1:2007 «Instrument transformers – Part 1: General requirements». – Geneva: IEC, 2007. – 62 p.
3. Кузнецов А.В., Петров С.К. Цифровые подстанции: технологии и перспективы. – М.: Энергоатомиздат, 2020. – 312 с.
4. IEEE Std C57.13-2016 «IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers». – New York: IEEE, 2016. – 89 p.
5. Смирнов В.И., Федоров А.А. Оптические методы измерений в электроэнергетике // Электричество. – 2019. – № 8. – С. 45-52.
6. Рекомендации CIGRE WG B5.05 «Digital Instrument Transformers: Technical and Practical Aspects». – Paris: CIGRE, 2018. – 114 p.
7. Голубков Е.Н. Интеллектуальные системы учета электроэнергии. – СПб.: Политехника, 2021. – 276 с.
8. Патен РФ № 2654878 «Способ компенсации погрешностей измерительных трансформаторов» / Иванов П.С. и др.; опубл. 10.05.2018.

MODERN MEASURING TRANSFORMERS: PRINCIPLES AND PROSPECTS

A.A. Idiyatullin, M.S. Garifullin

*Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia*

This article examines the key aspects of the operation of instrument current and voltage transformers, their role in electric power systems, and current trends in their improvement. The main focus is on signal conversion principles, factors affecting measurement accuracy, as well as innovative technologies such as digital and optical transformers. The prospects for integrating instrument transformers into Smart Grids and digital substation systems are analyzed.

Keywords: instrument transformers, current transformers, voltage transformers, measurement accuracy, digital substations, Smart Grid.

УДК 621.317.791

ЦИФРОВИЗАЦИЯ ПОДСТАНЦИЙ: РОЛЬ ЦИФРОВЫХ ЩИТОВЫХ ПРИБОРОВ В ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИСПЕТЧЕРСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

А.А. Идиятуллин, М.Ш. Гарифуллин

*Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия*

В статье рассматриваются вопросы цифровизации распределительных электрических сетей на примере модернизации подстанций с применением цифровых multifunctional щитовых приборов. Анализируется роль данных устройств в трансформации диспетчерского управления – от пассивного наблюдения к активному управлению режимами работы сети. Показано, что замена аналоговых измерительных приборов на цифровые комплексы не только повышает

наблюдаемость электрических режимов, но и создает фундамент для построения интегрированных систем диспетчеризации SCADA, обеспечивающих сокращение времени ликвидации аварий и предотвращение нештатных ситуаций.

Ключевые слова: цифровизация энергетики, цифровые щитовые приборы, диспетчерское управление, SCADA-системы, микропроцессорные устройства, модернизация подстанций, надежность электроснабжения.

Исторически на подстанциях применялись отдельные щитовые приборы для измерения каждого параметра: силы тока, напряжения, мощности, частоты. Диспетчер получал разрозненные данные, которые требовали ручного сопоставления и анализа [1]. Это увеличивало нагрузку на персонал и повышало риск человеческой ошибки, особенно в нештатных ситуациях.

Современные цифровые многофункциональные приборы (например, модели ЦМ-120, ЦМК-96 и их аналоги) принципиально меняют подход к измерениям. Один такой прибор способен заменить сразу несколько аналоговых устройств: амперметр, вольтметр, ваттметр, варметр и частотомер [3]. Но главное преимущество заключается не в компактности, а в цифровой природе сигнала. Приборы не только отображают текущие параметры на встроенном дисплее, но и передают данные по цифровым интерфейсам (обычно через RS-485 или Ethernet) на верхний уровень – контроллеры и автоматизированные рабочие места диспетчеров [3].

Цифровые приборы интегрируются с аппаратно-программными комплексами сбора и передачи информации, которые связаны с диспетчерскими центрами, где диспетчеры получают возможность дистанционно контролировать режимы работы оборудования подстанции. При этом система не только отображает текущие параметры, но и накапливает данные, позволяя анализировать тенденции и прогнозировать возможные перегрузки [1].

Современный диспетчерский пункт перестает быть просто набором приборов и мнемосхем. Он превращается в ситуационный центр, объединяющий данные SCADA-систем, оперативно-информационные комплексы, метеоданные и системы телемеханики. Например, на некоторых диспетчерских щитах дополнительно размещают табло метеостанции, показывающие температуру, скорость и направление ветра – факторы, критически важные для работы воздушных линий

Цифровизация подстанций с помощью многофункциональных измерительных приборов – это лишь первый этап масштабной трансформации. В перспективе такие системы эволюционируют в полноценные интеллектуальные платформы, способные не только информировать диспетчера, но и предлагать оптимальные решения либо автоматически управлять режимами работы сети.

Опыт показывает, что вслед за внедрением цифровых измерений следует модернизация релейной защиты и автоматики на базе микропроцессорных комплексов, что создает полностью цифровую среду управления энергообъектом [2]. Интеграция цифровых щитовых приборов с автоматизированными системами диспетчерского управления позволяет реализо-

вать телеуправление оборудованием, что особенно важно для оперативного восстановления электроснабжения потребителей [4].

Цифровизация старых подстанций с применением современных многофункциональных щитовых приборов является необходимым условием повышения надежности и эффективности распределительных сетей.

Такая модернизация позволяет:

- заменить устаревший парк аналоговых измерительных устройств;
- обеспечить высокую наблюдаемость электрических режимов;
- интегрировать подстанции в единую систему диспетчерского управления;
- сократить время локализации и устранения аварий;
- перейти к прогнозированию состояния оборудования и предиктивному обслуживанию.

Для потребителей результат цифровизации выражается в главном – сокращении длительности перерывов электроснабжения и повышении качества электроэнергии. Опыт энергокомпаний России подтверждает, что инвестиции в цифровые щитовые приборы и системы диспетчеризации быстро окупаются за счет снижения операционных затрат и предотвращения ущерба от аварийных отключений.]

Список использованных источников

1. Модернизация диспетчерского щита в Добрушском РЭС – РУП «Гомельэнерго» [Электронный ресурс]. <https://www.gomelenergo.by/news/modernizacija-dispatcherskogo-shhita-v-dobrushskom-rjes/>
2. «Россети» внедрили цифровые защиты на главном энергообъекте Тюменской области – УралБизнесКонсалтинг [Электронный ресурс]. <https://urbc.ru/1068140945-rosseti-vnedrili-cifrovye-zaschity-na-glavnom-jenergoobekte-tjumenskoj-oblasti.html>
3. «Пермэнерго» применяет цифровые технологии для питания объектов «Газпрома» – РУБЕЖ [Электронный ресурс]. <https://ru-bezh.ru/kompanii-iryinki/news/18/12/07/permenergo-primenyaet-cifrovye-tehnologii-dlya-pitaniya-obekto>
4. «Саратовские распределительные сети» реконструировали диспетчерский щит – ПАО «Россети Волга» [Электронный ресурс]. https://www.rossetivolga.ru/ru/press_tsentr/novosti_kompanii?id=6285

DIGITALIZATION OF SUBSTATIONS: THE ROLE OF DIGITAL PANEL INSTRUMENTS IN IMPROVING THE EFFICIENCY OF DISPATCH CONTROL

A.A. Idiyatullin, M.S. Garifullin

*Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia*

The article addresses the digitalization of distribution electrical networks through the example of substation modernization using digital multifunctional panel instruments. It analyzes the role of these devices in transforming dispatch control-from passive monitoring to active management of network operating conditions. It is shown that re-

placing analog measuring instruments with digital systems not only enhances the observability of electrical operating conditions but also lays the foundation for building integrated SCADA dispatch systems, which reduce emergency response times and prevent abnormal situations.

Keywords: *energy digitalization, digital panel instruments, dispatch control, SCADA systems, microprocessor devices, substation modernization, reliability of power supply.*

УДК 004.8:658.5

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИНТЕГРАЦИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В.Э. Имгрунт, Ю.В. Лузгина

*Сибирский государственный университет путей сообщения,
г. Новосибирск, Россия*

В статье рассматриваются ключевые вызовы на пути достижения технологического лидерства в промышленном секторе в условиях четвертой промышленной революции. Обосновывается необходимость перехода от фрагментарной автоматизации к системной интеграции технологий искусственного интеллекта. Проведен анализ современных барьеров, включая дефицит квалифицированных кадров, высокую стоимость внедрения и проблемы кибербезопасности. Предложена авторская концепция «интеллектуального конвейера компетенций» как стратегического инструмента для преодоления вызовов и реализации новых возможностей, обеспечивающих устойчивое лидерство промышленных предприятий.

Ключевые слова: *Искусственный интеллект, промышленность, технологическое лидерство, Индустрия 4.0, цифровая трансформация, интеллектуальные системы управления, киберфизические системы, кадровый потенциал.*

В современной геополитической и экономической парадигме технологическое лидерство становится не просто конкурентным преимуществом, а ключевым фактором национальной безопасности и устойчивого развития промышленности. Переход к новому технологическому укладу, определяемому концепцией Индустрии 4.0, характеризуется конвергенцией физических, цифровых и биологических систем, где центральную роль играют технологии искусственного интеллекта (ИИ).

Обзор литературы по проблематике (работы К. Шваба, М. Портера, а также исследования таких организаций, как Национальная академия наук Беларуси и Агентство по технологиям и инновациям) показывает, что основное внимание уделяется технологическим аспектам, в то время как вопросы управления изменениями и подготовки кадров часто остаются на периферии. В связи с этим возникает необходимость в разработке комплексных подходов, объединяющих технологические, организационные и образовательные аспекты для формирования устойчивого технологического лидерства.

Анализ текущего состояния промышленного сектора позволяет выделить три группы системных вызовов, критически влияющих на темпы и качество внедрения ИИ.

Первый вызов – кадровый дисбаланс. Согласно данным Международной федерации робототехники (IFR), рост спроса на специалистов в области ИИ и промышленной аналитики данных опережает предложение на рынке труда более чем в 2,5 раза. В Республике Беларусь, несмотря на сильную IT-школу, наблюдается дефицит специалистов, обладающих одновременно глубокими знаниями в области ИИ, пониманием технологических процессов конкретного производства и навыками работы с промышленным оборудованием. Традиционная система образования готовит либо инженеров-технологов, либо IT-специалистов, оставляя пробел в виде «Т-образных» специалистов, способных выступать в роли архитекторов гибридных киберфизических систем.

Второй вызов – высокая стоимость и риски внедрения. Переход от пилотных проектов к промышленной эксплуатации систем ИИ требует значительных капитальных вложений. Согласно исследованию BCG, до 70% проектов цифровой трансформации в промышленности не достигают поставленных целей, в основном из-за недостаточной интеграции с существующими ERP- и MES-системами, а также отсутствия стандартизированных подходов к оценке эффективности. В условиях высокой волатильности рынка и санкционного давления, предприятия вынуждены искать баланс между необходимостью инновационного развития и требованием быстрой окупаемости инвестиций (ROI).

Третий вызов – кибербезопасность и надежность. Интеграция ИИ делает промышленные сети более уязвимыми. Классические системы управления технологическими процессами (АСУ ТП), рассчитанные на изоляцию, при подключении к корпоративным сетям и облачным платформам становятся потенциальной мишенью для кибератак. Использование методов машинного обучения для управления критически важными производствами (энергетика, тяжелое машиностроение) требует абсолютной предсказуемости и верифицируемости решений, что вступает в противоречие с «черным ящиком» многих моделей глубокого обучения.

Несмотря на перечисленные вызовы, развитие технологий ИИ открывает беспрецедентные возможности для достижения технологического лидерства.

Во-первых, это переход к предиктивной и прескриптивной аналитике. Если раньше основой были системы, реагирующие на уже возникшие отклонения, то современные гибридные модели ИИ позволяют прогнозировать отказы оборудования за сотни часов до их наступления, а также не просто предлагать варианты действий, а автоматически оптимизировать режимы работы для достижения заданных KPI. Это снижает простои на 30-50% и продлевает ресурс оборудования на 20-25%.

Во-вторых, формируется концепция «Интеллектуального конвейера» (Smart Conveyor). Речь идет не о физическом транспорте, а о гибкой произ-

водственной логистике, управляемой ИИ. Системы компьютерного зрения и автономные мобильные роботы (AMR) обеспечивают полную прослеживаемость продукции и адаптивную маршрутизацию потоков, позволяя перенастраивать производственные линии под выпуск малых серий продукции без остановки основного производства. Это дает возможность реализовать стратегию «массовой кастомизации», что является ключевым признаком технологического лидера.

В-третьих, открываются новые горизонты в области управления жизненным циклом изделия (PLM). Использование генеративных нейросетей позволяет сократить время проектирования новых узлов и механизмов с нескольких недель до нескольких часов. Интеграция цифровых двойников (Digital Twins) с системами ИИ создает замкнутый контур обратной связи: физический объект передает данные в цифровую модель, ИИ анализирует их, генерирует улучшенную конструкцию или алгоритм управления, который затем тестируется на цифровом двойнике и только после этого внедряется в реальное производство.

Для системного преодоления вызовов и эффективной реализации возможностей предлагается концепция, которую можно обозначить как «Интеллектуальный конвейер компетенций». Данная концепция базируется на трех ключевых уровнях:

1. Технологический уровень: формирование единого цифрового пространства предприятия на основе промышленного интернета вещей (IIoT) и платформ с открытым API. Это позволяет интегрировать гетерогенные системы (АСУ ТП, MES, ERP) и создавать условия для масштабирования решений ИИ от отдельных участков до уровня всего предприятия.

2. Организационный уровень: внедрение Agile-методологий в промышленность, создание междисциплинарных команд (data scientists, инженеры-технологи, операционщики). Ключевым элементом является создание «фабрик алгоритмов» (AI Factories) – специализированных подразделений, которые занимаются не разовой разработкой, а непрерывным циклом сбора данных, обучения моделей, их развертывания и мониторинга эффективности в промышленной среде.

3. Образовательный уровень: партнерство промышленности и вузов для создания непрерывной системы подготовки кадров. Предлагается внедрение модулей «Промышленный ИИ» в учебные планы не только IT-специальностей, но и машиностроительных, энергетических, приборостроительных направлений. Формат «dual education» с обязательной стажировкой студентов на промышленных площадках позволит сократить разрыв между академическими знаниями и реальными производственными задачами.

Реализация данной концепции позволяет превратить кадровый вызов из препятствия в драйвер развития, а сложность интеграции – в фактор, обеспечивающий высокий порог входа для конкурентов.

В ходе проведенного исследования были выявлены ключевые вызовы на пути достижения технологического лидерства в промышленности: де-

фицит междисциплинарных кадров, высокие риски и стоимость внедрения ИИ, а также проблемы кибербезопасности. В то же время установлено, что современные технологии предиктивной аналитики, гибкой автоматизации и генеративного проектирования открывают новые возможности для повышения эффективности и создания продуктов с высокой добавленной стоимостью.

Главным выводом работы является утверждение, что технологическое лидерство в эпоху Индустрии 4.0 достигается не просто за счет внедрения отдельных «умных» устройств, а за счет формирования целостной экосистемы, объединяющей технологии, организационную структуру и человеческий капитал. Предложенная концепция «Интеллектуального конвейера компетенций» позволяет системно подойти к решению выявленных проблем и обеспечить устойчивое конкурентное преимущество промышленных предприятий.

Список использованных источников

1. Шваб, К. Четвертая промышленная революция : пер. с англ. / К. Шваб. – Москва: Эксмо, 2016. – 208 с.
2. Портер, М. Конкуренция : пер. с англ. / Майкл Портер. – Испр. изд. – Москва [и др.]: Вильямс, 2005. – 602 с.
3. Об утверждении Стратегии развития искусственного интеллекта в Республике Беларусь на 2022–2025 годы: Постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 28 окт. 2021 г., № 620. – Минск, 2021.
4. Ransbotham, S. Winning With AI: The State of AI in 2023 / S. Ransbotham, D. Kiron, P. Gerbert // MIT Sloan Management Review. – 2023. – Vol. 64, № 2. – P. 1–10. – URL: <https://sloanreview.mit.edu/projects/winning-with-ai> (дата обращения: 10.04.2026).
5. Lee, J. Industrial Artificial Intelligence for Industry 4.0-based Manufacturing Systems / J. Lee, H. Davari, J. Singh // Manufacturing Letters. – 2018. – Vol. 18. – P. 20–23.
6. Использование технологий искусственного интеллекта в реальном секторе экономики: аналитический доклад / НИУ ВШЭ ; под ред. П.Б. Рудника. – Москва: НИУ ВШЭ, 2023. – 124 с.

NEW OPPORTUNITIES FOR THE INTEGRATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN INDUSTRY

V.E. Imgrunt, Yu.V. Luzgina

*Siberian Transport University,
Novosibirsk, Russia*

The article discusses the key challenges in achieving technological leadership in the industrial sector in the context of the fourth industrial revolution. The necessity of transition from fragmented automation to the systemic integration of artificial intelligence technologies is substantiated. The paper analyzes current barriers, including a shortage of qualified personnel, high implementation costs, and cybersecurity issues. The author proposes the concept of an «intelligent competency pipeline» as a strategic

tool for overcoming challenges and realizing new opportunities that ensure sustainable leadership for industrial enterprises.

Keywords: Artificial intelligence, industry, technological leadership, Industry 4.0, digital transformation, intelligent control systems, cyber defense

УДК 658.5:339.137.2

ВЛИЯНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ ПРОДУКЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Э.М. Каан¹

*Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия*

В статье рассматривается влияние современных производственных и цифровых технологий на конкурентоспособность продукции промышленных предприятий. Показано, что технологическое обновление связано с повышением качества, снижением издержек, сокращением производственного цикла и укреплением доверия потребителей. Особое внимание уделяется контролю качества, цифровому сопровождению жизненного цикла продукции и подготовке персонала.

Ключевые слова: технология, конкурентоспособность продукции, качество, промышленное предприятие, инновации, цифровизация, эффективность, жизненный цикл продукции.

Введение

В современных условиях промышленные предприятия сталкиваются с высокой конкуренцией. Покупатель оценивает продукцию не только по цене, но и по качеству, надежности, сроку службы, удобству эксплуатации и сервисному сопровождению. Поэтому конкурентоспособность продукции является комплексной характеристикой, которая зависит от технических, экономических и организационных факторов. Одним из наиболее важных факторов выступает технология производства.

Технология определяет, каким способом создается продукция, какие материалы используются, насколько точно соблюдаются параметры процесса и как быстро предприятие может реагировать на изменение спроса. Если предприятие применяет устаревшее оборудование и плохо контролирует производство, ему сложно выпускать стабильную продукцию. В результате даже приемлемая цена не всегда обеспечивает устойчивое положение на рынке.

Конкурентоспособность продукции и роль технологии

Конкурентоспособность продукции можно понимать как способность товара успешно сравниваться с аналогами и быть выбранным потребите-

¹ Научный руководитель: Бадртдинова Р.Р.

лем. Она формируется за счет качества, цены, безопасности, дизайна, надежности, соответствия стандартам и репутации производителя. При этом качество и конкурентоспособность не полностью совпадают. Качественная продукция может проигрывать конкурентам, если ее себестоимость и цена слишком высоки. Дешевый товар, наоборот, может быстро потерять спрос из-за низкой надежности.

Современная технология помогает предприятию найти баланс между качеством и затратами. Более точное оборудование уменьшает количество дефектов, ресурсосберегающие процессы снижают расход материалов и энергии, а автоматизация делает выпуск более стабильным. В результате предприятие может производить продукцию с лучшими потребительскими свойствами без чрезмерного роста цены.

Особое значение имеет гибкость производства. Рынок меняется быстро, и потребители чаще требуют индивидуальных характеристик товара. Предприятие, которое способно быстрее перенастроить процесс, изменить конструкцию изделия или выпустить небольшую партию, получает преимущество перед конкурентами. Для этого применяются компьютерное проектирование, моделирование, системы планирования производства и цифровой обмен данными между подразделениями.

Цифровизация и контроль качества

Цифровые технологии влияют на все этапы жизненного цикла продукции: проектирование, подготовку производства, выпуск, контроль, продажу и сервис. Системы автоматизированного проектирования позволяют заранее выявлять ошибки конструкции и сокращать сроки разработки. Производственные информационные системы помогают планировать загрузку оборудования, отслеживать выполнение заказов и фиксировать отклонения в процессе.

Большую роль играет сбор и анализ данных. Если предприятие регулярно получает информацию о причинах брака, простоях оборудования, расходе материалов и обращениях потребителей, оно может принимать более обоснованные решения. В этом случае технология становится не только производственным, но и информационным ресурсом. Она помогает не просто выпускать продукцию, а постоянно улучшать ее характеристики.

Контроль качества должен осуществляться не только в конце производства, когда изделие уже готово. Более эффективным является подход, при котором качество обеспечивается на всех этапах: при выборе материалов, настройке оборудования, выполнении операций и проверке готовой продукции. Технический и метрологический контроль позволяют вовремя выявлять отклонения и предупреждать появление брака. Это снижает затраты и повышает доверие клиентов.

Экономический эффект и проблемы внедрения

Внедрение современных технологий может дать предприятию заметный экономический эффект. Он выражается в росте производительности труда, снижении себестоимости, уменьшении количества рекламаций и повышении удовлетворенности потребителей. Однако технологическая

модернизация требует инвестиций, поэтому она должна быть экономически обоснованной. Перед внедрением необходимо определить, какую проблему решает новое оборудование или программа, какие показатели должны улучшиться и за какой срок ожидается результат.

Существуют и определенные риски. Новые технологии требуют подготовки специалистов, изменения привычных процессов и иногда вызывают сопротивление работников. Если персонал не понимает цели изменений, внедрение может замедлиться. Поэтому модернизация должна сопровождаться обучением сотрудников, разработкой понятных инструкций и постепенным включением новых решений в работу предприятия.

Для повышения конкурентоспособности продукции целесообразно действовать поэтапно. Сначала предприятие должно изучить требования потребителей и сравнить свою продукцию с аналогами. Затем необходимо определить слабые места производства: высокий процент брака, большие потери материалов, долгий цикл выпуска или недостаточный контроль качества. После этого можно выбирать технологические решения, которые действительно влияют на результат.

Заключение

Современные технологии оказывают прямое влияние на конкурентоспособность продукции промышленных предприятий. Они помогают повышать качество, снижать издержки, ускорять производственный процесс и лучше контролировать стабильность выпуска. Однако технология эффективна только тогда, когда она связана с реальными задачами предприятия и поддержана системой управления качеством.

Таким образом, конкурентоспособность продукции формируется не только на рынке, но и внутри самого производства: при проектировании, выборе материалов, настройке процессов и контроле качества. Предприятие, которое постоянно обновляет технологии и развивает компетенции персонала, получает больше возможностей для устойчивого развития и сохранения конкурентных преимуществ.

Список использованных источников

1. Розенталь О.М. Метрологическое обеспечение контроля качества продукции // Стандарты и качество. – 2020. – № 5. – С. 23–27. – EDN: IEMRUF.
2. Кудрявцев В.Ю., Галасс Т.Ю., Степанова И.С., Дробышев А.А. Технический контроль как инструмент повышения конкурентоспособности продукции комбината // Горный журнал. – 2022. – № 6. – С. 49–53. – EDN: LYCDKQ. – DOI: 10.17580/gzh.2022.06.05.
3. Славчева Г.С., Акулова И.И. Определение первоочередных направлений повышения качества и конкурентоспособности строительных материалов: методика и алгоритм // Строительные материалы. – 2022. – № 3. – С. 56–60. – EDN: IZVGSE.
4. Макиева А. Цифровая трансформация управления жизненным циклом наукоемкой продукции // Стандарты и качество. – 2025. – № 5. – С. 10–11. – EDN: NFZSES.
5. Глущенко В.В. Проектирование систем технического сервиса изделий машиностроения // Вестник машиностроения. – 2020. – № 8. – С. 82–88. – EDN: LSJPEW.

IMPACT OF MODERN TECHNOLOGIES ON THE COMPETITIVENESS OF INDUSTRIAL PRODUCTS

E.M. Kaan¹

*Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia*

The article examines the influence of modern production and digital technologies on the competitiveness of industrial products. It is shown that technological renewal improves quality, reduces costs, shortens the production cycle and increases consumer confidence. Special attention is paid to quality control, digital product life cycle support and staff training.

Keywords: technology, product competitiveness, quality, industrial enterprise, innovation, digitalization, efficiency, product life cycle.

УДК 613.644:331.4.

К ПРОБЛЕМЕ ИЗУЧЕНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ШУМА НА РАБОТНИКОВ И ЕГО НОРМИРОВАНИЯ НА РАБОЧИХ МЕСТАХ

В.Д. Катин^{1,2}, А.А. Журавлев¹

¹*Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, Россия*

²*Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия*

В статье рассматривается комплексное влияние производственного шума как многофакторного вредного профессионального агента. Освещены механизмы системного действия акустического загрязнения. Обосновывается, что даже шум средних уровней (ниже 80 дБА) обладает утомляющим эффектом, синергически суммирующимся с тяжестью и напряженностью труда. На основе аудиометрического контроля и международных стандартов изложена методология оценки риска потери слуха. Центральное место занимает концепция биологической эквивалентности эффектов шума и нервно-психической нагрузки, позволившая разработать дифференцированные нормативы допустимых уровней звука с учетом категорий тяжести и напряженности трудового процесса. Представлены практические рекомендации, направленные на повышение эффективности профилактики шумовой патологии и сохранение профессионального здоровья работников.

Ключевые слова: производственный шум, шумовая болезнь, аудиометрический контроль, порог слуховой чувствительности, профессиональная тугоухость, эквивалентный уровень звука, тяжесть труда, напряжённость труда, дифференцированное нормирование, профилактика.

Среди разнообразных неблагоприятных факторов рабочей среды акустическое загрязнение занимает особое место в силу широкой распространенности и выраженного воздействия практически на все системы орга-

¹ Scientific supervisor: Badrtdinova R.R.

низма. В соответствии с [1, 2] установлены предельно допустимые величины производственного шума и закреплён принцип недопустимости превышения данных нормативов. Особую тревогу вызывает то обстоятельство, что длительная экспозиция эквивалентными уровнями звука свыше 80 дБА запускает каскад патологических реакций, формируя шумовую болезнь, при которой поражение звуковоспринимающего аппарата (от частичной тугоухости до полной глухоты) сочетается с дисфункцией центральной нервной, сердечно-сосудистой, пищеварительной и эндокринной систем. Именно это придает проблеме снижения шумовой нагрузки высокую актуальность и практическую значимость.

В структуре профессиональной заболеваемости Российской Федерации шумовая патология устойчиво занимает третью позицию, уступая лишь вибрационной болезни и пневмокониозам [1-4]. Более того, экспериментальные и натурные исследования, включая собственные данные авторов, свидетельствуют, что при интенсивном шуме трудоспособность падает примерно на 30 %, ослабляется концентрация внимания, что закономерно ведет к росту травматизма [3]. Вредное влияние шума на человека чрезвычайно многолико.

Отечественная система оценки шумового фактора с уровнями выше 80 дБА базируется прежде всего на анализе влияния на орган слуха. Степень кохлеарных повреждений определяется как физическими характеристиками (уровнем звука и его длительностью), так и индивидуальной восприимчивостью работника. Методология прогнозирования снижения слуха в зависимости от шумовой экспозиции унифицирована на международном уровне: стандарт ISO 1999:2013 устанавливает количественные соотношения между эквивалентным уровнем звука, стажем работы в условиях шума и ожидаемой долей лиц с ухудшением слуховой функции [1].

Профилактическая стратегия обеспечения безопасных условий труда по шумовому фактору опирается на аудиометрический контроль работников, позволяющий объективно оценить состояние органа слуха. Оценка результатов аудиометрии производится путем вычисления среднеарифметического снижения порогов слуховой чувствительности в диапазоне речевых частот (500-2000 Гц), а также на частоте 4000 Гц, где обычно инициируются шум-индуцированные повреждения улитки.

По данным [3], выделяют три степени слуховых потерь: I степень (легкое снижение) – повышение порогов в речевой зоне на 10-20 дБ; II степень (умеренное) – сдвиг 21-30 дБ; III степень (значительное) – утрата слуха на 31 дБ и более. Предварительные (при приеме на работу) и периодические медицинские осмотры, обязательно включающие аудиометрию, дают возможность выявлять начальные формы кохлеарных нарушений у гиперчувствительных к шуму лиц и своевременно принимать меры по сохранению профессионального долголетия.

Необходимо подчеркнуть, что патофизиологическое действие шума отнюдь не ограничивается слуховым анализатором. Акустическая стимуляция по волокнам слуховых нервов передается в центральную и ав-

тономную нервную систему, а через нее опосредованно изменяет деятельность внутренних органов, вызывает значительные функциональные сдвиги и модифицирует психический статус, порождая чувство тревоги и раздражения. Установлено, что для поддержания выработки, достигнутой при фоновом уровне звука ниже 70 дБА, человеку, работающему в условиях интенсивного шума, приходится затрачивать в среднем на 10-20% больше физических и нервно-психических ресурсов. У контингентов шумных производств зафиксирован подъем общей заболеваемости на 10-15% [3].

Реакции вегетативного отдела нервной системы проявляются даже при относительно невысоких уровнях звука (40-70 дБА) и не зависят от его субъективного восприятия. Среди вегетативных сдвигов наиболее демонстративны нарушения периферической гемодинамики вследствие сужения капилляров кожи и слизистых оболочек, а также артериальная гипертензия при превышении 80 дБА. В психической сфере, напротив, четкое соответствие между параметрами шума и реакцией отсутствует: выраженные психические реакции регистрируются уже начиная с 30 дБА, причем решающую роль играет личностное отношение к акустическому раздражителю. С ростом частоты и уровня шума, а также с сужением его частотной полосы неблагоприятное действие на психику усиливается [3]. Со стороны ЦНС наблюдаются увеличение латентного периода зрительно-моторной реакции, нарушения подвижности нервных процессов, изменения электроэнцефалографических показателей. Импульсные и нерегулярные шумы обладают повышенной биологической агрессивностью: функциональные отклонения как в центральной, так и в вегетативной нервной системе возникают значительно раньше и при меньших уровнях, нежели снижение слуховой чувствительности.

Современная медицина описывает шумовую болезнь как комплексный синдром, объективные проявления которого включают снижение слуха, гипоацидные изменения пищеварительной секреции, сердечно-сосудистую недостаточность и нейроэндокринные расстройства [3]. Лица, длительно подвергающиеся шумовому воздействию, предъявляют жалобы на раздражительность, головные боли, головокружение, ухудшение памяти, повышенную утомляемость, снижение аппетита, болевые ощущения в ушах. Подобные сдвиги способны провоцировать негативные изменения эмоционального фона вплоть до стрессовых состояний. Падение концентрации внимания, нарушение физиологических функций, усталость из-за повышенных энергозатрат и нервно-психического напряжения, ухудшение речевой коммутации – все это не только подрывает работоспособность, но и снижает качество и безопасность труда. При работах, требующих высокой степени внимания, рост уровня звука с 70 до 90 дБА сопряжен со снижением производительности на 20-30% [3, 4].

Принципиально важно понимать, что даже шумы средних уровней (ниже 80 дБА), сами по себе не вызывающие потери слуха, оказывают вы-

раженное утомляющее действие, суммирующееся с влиянием тяжести и напряженности трудового процесса. Исходя из этого, была сформулирована гипотеза о тождественности и синергичности эффектов акустического фактора как компонента рабочей среды и собственно трудовой нагрузки на целостный организм человека, выполняющего, в частности, функции оператора печи или котла [3, 4]. Практическим воплощением данной концепции стали дифференцированные рекомендации по безопасным эквивалентным уровням звука, учитывающие одновременно категории тяжести и напряженности труда. Эти рекомендации, представленные ниже в обобщенной форме, базируются на постулате, согласно которому нулевой риск потери слуха соответствует уровню 80 дБА [3].

Для легкого и среднетяжелого труда при малой напряженности безопасный предел сохраняется на отметке 80 дБА. Переход к тяжелому и очень тяжелому труду при той же незначительной нервно-психической нагрузке требует ужесточения норматива до 75 дБА. При умеренной напряженности труда допустимые значения снижаются до 70 дБА в случае легких и средних по тяжести работ и до 65 дБА для тяжелых работ. Напряженный труд в сочетании с легкой или средней физической нагрузкой допускает уровень звука не более 60 дБА, а очень напряженный – не выше 50 дБА. Сочетания тяжелого и очень тяжелого труда с напряженным и очень напряженным помечены как практически недопустимые, поскольку их реализация противоречит санитарно-гигиеническим требованиям оздоровления условий труда.

Таким образом, анализ показывает, что надежная защита работников от производственного шума не может опираться исключительно на аудиометрические показатели и единый фиксированный гигиенический норматив. Системный характер шумовой патологии и доказанная синергия акустического фактора с тяжестью и напряженностью трудового процесса диктуют необходимость использования дифференцированных критериев допустимых уровней звука, таких как рассмотренная матрица, связывающая санитарные нормативы с категориями условий труда. Подобный подход открывает путь к более эффективной профилактике как потери слуха, так и экстраауральных нарушений, способствуя сохранению здоровья, работоспособности и профессионального долголетия персонала.

Список использованных источников

1. Международный стандарт ИСО. Акустика. Оценка воздействия шума с целью сохранения слуха. – М.: ИСО, 2013. – 47 с.
2. ГОСТ 12.1.003-2014. Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности. – М.: Изд-во стандартов, 2014. – 31 с.
3. Борьба с шумом на производстве : справочник / под ред. Е.Я. Юда. – М.: Машиностроение, 2005. – 400 с.
4. Тупов, В.Б. Охрана окружающей среды от шума энергетического оборудования / В.Б. Тупов, Л.А. Рихтер. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 112 с.

TO THE PROBLEM OF STUDYING THE IMPACT OF INDUSTRIAL NOISE ON WORKERS AND ITS STANDARDIZATION IN THE WORKPLACE

V.D. Katin^{1,2}, A.A. Zhuravlev¹

¹Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia

²Pacific National University, Khabarovsk, Russia

This article examines the complex impact of industrial noise as a multifactorial, harmful professional agent. The mechanisms underlying the systemic effects of acoustic pollution are highlighted. It is demonstrated that even moderate-level noise (below 80 dBA) has a fatiguing effect, synergistically interacting with the severity and intensity of work. Based on audiometric testing and international standards, a methodology for assessing the risk of hearing loss is presented. Central to this is the concept of biological equivalence between the effects of noise and neuropsychic stress, which has allowed the development of differentiated standards for permissible sound levels based on the severity and intensity of the work process. Practical recommendations are presented aimed at improving the effectiveness of noise-related pathology prevention and maintaining the occupational health of workers.

Keywords: industrial noise, noise disease, audiometric testing, hearing threshold, occupational hearing loss, equivalent sound level, severity of work, work intensity, differentiated standardization, prevention.

УДК 621.3

СТАНОВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ЦИКЛА

А.Б. Квасюк

*Волжский государственный университет водного транспорта,
г. Нижний Новгород, Россия*

В статье рассматривается формирование электротехнических наук как самостоятельной отрасли знания. На основе истории физики и техники реконструированы основные этапы: от открытий Эрстеда и Ампера до создания лабораторий, научных обществ и систем образования. Показана роль российских учёных в разработке принципа обратимости электрических машин. Утверждается, что к концу XIX века сложились все атрибуты полноценной технической дисциплины: кафедры, журналы, профессиональные сообщества и стандартизированная система единиц.

Ключевые слова: история электротехники, электродинамика, правило Ленца, обратимость электрических машин, институционализация науки.

Введение

То, что сегодня называется электротехническим циклом наук, привычно и незаметно, как воздух. Лампочка зажигается нажатием кнопки, элек-

тромотор вращает вентилятор, микроволновая печь готовит еду. За всем этим стоит сложнейшая история превращения «янтарной палочки» в строгую инженерную дисциплину. Этапы этого превращения от физических открытий к лабораториям, от лабораторий к учебным заведениям и профессиональным сообществам составляют содержание предлагаемой статьи.

От «сырого» электричества к точным расчётам

До начала XIX века электричество было уделом шарлатанов и физиков-одиночек. Лейденская банка давала эффектную искру, но не непрерывный ток. Всё изменил Алессандро Вольт, в 1800 году создавший первый химический источник тока – вольтов столб. «Это был тот недостающий кирпичик, без которого здание электротехники так и осталось бы грудой лабораторных курьёзов», – замечает Я.А. Шнейберг [1].

Следующий толчок дал датчанин Ханс Кристиан Эрстед. В 1820 году он обнаружил, что электрический ток отклоняет магнитную стрелку. Именно опыт Эрстеда, выявивший связь между электричеством и магнетизмом, заложил физический принцип, который лёг в основу всех без исключения электротехнических машин XIX столетия. Француз Андре-Мари Ампер почти мгновенно превратил этот эмпирический факт в математическую теорию, сформулировав закон взаимодействия токов и введя само понятие «электродинамика». Немец Георг Симон Ом дал инженерам главный рабочий инструмент. В 1827 году он установил связь между током, напряжением и сопротивлением ($I = U/R$). Без закона Ома немислим ни один расчёт электрической цепи – от карманного фонарика до подстанции [2].

Фарадей, Ленц и рождение энергетики

Поворотным моментом стал 1831 год, когда Майкл Фарадей открыл электромагнитную индукцию: изменение магнитного поля порождает ток. В том же году он построил диск Фарадея, который считается первым в мире генератором. Механическую энергию можно было превращать в электрическую. Это событие принято считать точкой отсчёта в истории электроэнергетики.

Однако открытие Фарадея оставалось качественным. Он не дал простого правила, как определить направление индуцированного тока. Эту задачу решил в 1834 году российский академик Эмилий Христианович Ленц. Его правило сегодня формулируют кратко: индукционный ток всегда направлен так, чтобы противодействовать причине, его вызвавшей. Ленц пошёл дальше. Вместе с Б.С. Якоби он в конце 1830-х годов поставил серию опытов, доказавших принцип обратимости электрических машин. Одна и та же конструкция может работать и двигателем, преобразуя электричество в механическую работу, и генератором, превращая вращение в ток.

Этот принцип имел огромное практическое значение. Промышленник, купивший электродвигатель, получал и резервный генератор. А при спуске поезда под уклон тяговые двигатели превращаются в генераторы, возвращая энергию в сеть – рекуперативное торможение, основанное на открытии Ленца и Якоби. Работы Ленца стали связующим звеном, позволившим перевести теоретические принципы электродинамики Фарадея на язык инженерных расчётов и конструкторских решений.

Институционализация: от лабораторий к обществам

К 1870-м годам электротехника обрела теоретический фундамент, но не имела системной подготовки кадров. Перелом наступил в 1883 году, когда в Лондоне открылся Финсбери-колледж, который является первым в мире учебным заведением с обязательным лабораторным практикумом. В 1884 году заработал Центральный технический колледж в Южном Кенсингтоне, где профессором электротехники был Уильям Эйртон. Он стал автором классической книги «Практическая электротехника».

В России в 1891 году был открыт Электротехнический институт. Он стал одним из первых специализированных вузов в мире. А в 1901 году Михаил Андреевич Шателен, первый в России профессор электротехники, организовал электромеханическое отделение Петербургского политехнического института, создав высоковольтную лабораторию и первую систему лабораторного практикума по образцу английских колледжей.

Параллельно возникали профессиональные сообщества, например, Society of Telegraph Engineers (Великобритания, 1871), VDE (Германия, 1883), AIEE (США, 1884). Важным шагом в институционализации отечественной электротехники стало создание в 1886 году Электротехнической секции при Русском техническом обществе. В 1896 году секция преобразовалась в независимое Русское электротехническое общество, получившее собственную печатную платформу – журнал «Электричество» [3].

Стандартизация и победа переменного тока

Бурный рост электротехнической промышленности требовал единого языка измерений. В 1881 году Первый Международный конгресс электриков в Париже ввёл единицы: ом, ампер, вольт, фарада и кулон. В 1889 году добавили ватт. Принятые на конгрессах единицы измерения позволили унифицировать техническую терминологию и обеспечить взаимопонимание между специалистами разных стран.

Конгресс столкнулся и с «войной токов» – конфликтом между сторонниками постоянного в лице Эдисона и переменного тока, приверженцами которого были Тесла и Вестингауз. Эдисон доказывал опасность переменного тока, демонстрируя убийство животных высоким напряжением. Однако технические аргументы оказались сильнее. Переменный ток позволял с помощью трансформаторов повышать напряжение для передачи на дальние расстояния и понижать для потребителя. В 1893 году система переменного тока Вестингауза была выбрана для освещения Всемирной выставки в Чикаго, а в 1895 году гидроэлектростанция на Ниагаре начала передавать переменный ток в Баффало за 30 километров. Победа переменного тока стала символом торжества инженерного расчёта над коммерческими амбициями [4].

Заключение

К 1900 году электротехнический цикл наук сложился как полноценная система. У него были свои теоретические основы, учебные заведения и кафедры, профессиональные общества, стандарты и промышленность. Дальнейшее развитие в области электроники, полупроводников и компьютеров

лишь надстраивалось над этим фундаментом. А принцип обратимости Ленца–Якоби, сформулированный почти два века назад, по-прежнему лежит в основе любого электропривода с рекуперацией от трамвая до электромобиля.

Список использованных источников

1. Шнейберг Я.А. Титаны электротехники: очерки жизни и творчества. – М.: Издательство МЭИ, 2004. – 271 с. – EDN: QMIPVR
2. Карцев В.П. Приключения великих уравнений. – М.: Знание, 1971. – 320 с. – EDN: QJSNKX
3. Иванов Б.И., Вишневецкий Л.М., Левин Л.Г. История развития электротехники в Санкт-Петербурге. – СПб.: Наука, 2001. – 208 с. – EDN: TDZORL
4. Юдаев И.В., Глушко И.В., Зуева Т.М. История науки и техники: электроэнергетика и электротехника. – СПб.: Лань, 2019. – 340 с. – EDN: TLSIZK

THE FORMATION OF ELECTRICAL ENGINEERING SCIENCES

A.B. Kvasiuk

*Volga State University of Water Transport,
Nizhny Novgorod, Russia*

The article examines the formation of electrical engineering as an independent branch of knowledge. Based on the history of physics and technology, the main stages are reconstructed: from the discoveries of Oersted and Ampère to the creation of laboratories, scientific societies and education systems. The role of Russian scientists in developing the principle of reversibility of electrical machines is shown. It is argued that by the end of the 19th century all attributes of a full-fledged technical discipline had emerged: departments, journals, professional communities and a standardized system of units.

Keywords: *history of electrical engineering, electrodynamics, Lenz's rule, reversibility of electrical machines, institutionalization of science.*

УДК 004.855.5

МОДИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА XGBOOST ДЛЯ УЧЕТА НЕСТАЦИОНАРНОСТИ ДАННЫХ В ЗАДАЧАХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РИСКОВ ИТ-ПРОЕКТОВ

А.А. Кечкина, В.Н. Богатилов, С.А. Ситников

*Тверской государственный технический университет,
г. Тверь, Россия*

В статье рассматривается проблема нестационарности данных в задаче прогнозирования рисков срыва сроков ИТ-проектов. Классический алгоритм градиентного бустинга (XGBoost) считает все наблюдения равнозначными, что снижает его эффективность при изменении условий и различной важности фаз жизненного цикла. Предлагается модификация целевой функции XGBoost путем введения адаптивного весового коэффициента α_i . Модифицированная функция

потерь учитывает значимость наблюдения в зависимости от его актуальности (экспоненциальное забывание) и критичности фазы проекта. Выведены новые аналитические выражения для градиента и гессиана, интегрируемые в алгоритм. Экспериментальная верификация на данных четырех проектов отдела перспективных разработок НПП «ИТЭЛМА» показала, что модифицированная модель повышает внимание к проектам в фазе тестирования в 3.4 раза, что позволяет прогнозировать риски за 3–4 недели до критической точки.

Ключевые слова: XGBoost, градиентный бустинг, управление ИТ-проектами, нестационарность данных, адаптивные веса, прогнозирование рисков.

Современная индустрия разработки программного обеспечения характеризуется высокой степенью неопределенности и требований к срокам поставки. Традиционные реактивные методы управления, когда проблема обнаруживается уже после ее возникновения, демонстрируют недостаточную эффективность. В этих условиях особую актуальность приобретают методы машинного обучения, в частности градиентный бустинг на базе XGBoost, позволяющие на основе исторических метрик проекта прогнозировать вероятность срыва сроков [1, 2]. Однако классическая модель XGBoost обладает фундаментальным ограничением применительно к ИТ-проектам: она считает все наблюдения в обучающей выборке равнозначными и независимыми. Это предположение нарушается по двум причинам – различная важность фаз жизненного цикла (ошибка на фазе тестирования критичнее, чем на этапе инициации) и старение данных (изменение методологий и составов команд приводит к тому, что старые данные теряют актуальность).

Целью работы является повышение эффективности прогнозирования рисков ИТ-проектов за счет модификации математической модели градиентного бустинга, устраняющей указанные ограничения.

Для формализации задачи ИТ-проект представим в виде динамической системы, состояние которой в момент времени t описывается вектором метрик $X(t)$. В работе выделяются пять групп метрик: скорость (Velocity Deviation), незапланированные работы (Unplanned Work Ratio), плотность дефектов (Defect Density), время цикла согласования требований (Requirements Cycle Time) и точность оценки трудозатрат (Estimation Accuracy). Целевая бинарная переменная $Y(t+\Delta t)$ принимает значение 1, если проект через интервал Δt окажется в состоянии риска (срыв срока или превышение бюджета), и 0 в противном случае. Таким образом, требуется построить модель F , оценивающую вероятность $P(Y=1 | X(t))$.

Для решения поставленной задачи предлагается модифицировать классическую функцию потерь XGBoost. В стандартном алгоритме оптимизация выполняется путем минимизации логистической функции потерь (log-loss). Модифицированная функция потерь принимает вид:

$$L_{new} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \log(1 + e^{-y_i \hat{y}_i}) + \lambda \Omega,$$
 где $\hat{y}_i$ – сырое предсказание модели (лог-шансы), $\lambda \Omega$ – регуляризационный член XGBoost (не изменяется), а α_i – адаптивный весовой коэффициент, характеризующий значимость i -го наблюдения.

Итоговый вес α_i является произведением двух независимых компонентов: веса фазы жизненного цикла $\beta(p)$ и коэффициента временного затухания $\gamma(\Delta t)$: $\alpha_i = \beta(p_i) \cdot \gamma(\Delta t_i)$

Вес фазы $\beta(p)$ отражает относительную важность прогноза на различных стадиях проекта. Эмпирические значения, установленные на основе экспертных оценок в НПП «ИТЭЛМА», представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Веса фаз жизненного цикла проекта

Фаза проекта (p)	Вес фазы (β)
Инициация	0.7
Разработка	1.0
Тестирование	1.8
Релиз	1.3
Поддержка	0.6

Максимальный вес (1.8) присвоен фазе тестирования, поскольку стоимость исправления дефекта на этой стадии многократно ниже, чем после релиза.

Для учета старения данных используется модель экспоненциального затухания:

$$\gamma(\Delta t) = \exp\left(-\frac{\delta \cdot \Delta t}{\tau}\right),$$

где $\Delta t = t_{current} - t_i$ – возраст наблюдения в днях, δ – коэффициент скорости забывания (рекомендуемый диапазон 0,01–0,1), $\tau = 30$ дней – нормировочный период. Функция обеспечивает монотонное убывание веса со временем: чем старше данные, тем меньше их влияние на текущую модель.

Ключевым результатом работы является вывод аналитических выражений для градиента и гессiana модифицированной функции потерь. Для логистической функции потерь классический градиент имеет вид $g_i = p_i - y_i$. С учетом весового коэффициента модифицированный градиент принимает форму:

$$g_i^{mod} = \alpha_i \cdot (p_i - y_i).$$

Модифицированный гессиан (вторая производная) преобразуется следующим образом:

$$h_i^{mod} = \alpha_i \cdot p_i \cdot (1 - p_i).$$

Данные выражения интегрируются в алгоритм построения деревьев XGBoost, заменяя стандартные значения на каждом шаге аддитивного обучения.

Экспериментальная апробация проводилась на ретроспективных данных четырех научно-исследовательских и опытно-конструкторских проектов («Альфа», «Бета», «Гамма», «Дельта») отдела перспективных разработок НПП «ИТЭЛМА». Моделирование выполнялось с параметрами $\delta=0.05$, $\tau=30$ дней. Результаты расчета адаптивных весов представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Расчет адаптивных весов для проектов

Проект	Фаза на 01.05	β	Δt (дней)	$\gamma(\Delta t)$	α_{total}
Альфа	Поддержка	0.6	61	0.903	0.54
Бета	Поддержка	0.6	90	0.861	0.52
Гамма	Тестирование	1.8	-14*	1.000	1.84
Дельта	Релиз	1.3	30	0.951	1.24

* Для будущих наблюдений γ принимается равным 1.

Как видно из таблицы, проект «Гамма» (находится в фазе тестирования) получил максимальный вес (1.84), что в 3,4 раза превышает вес завершенных проектов «Альфа» и «Бета» (0.54 и 0.52). Это демонстрирует, что модифицированная модель автоматически фокусируется на наиболее актуальных и критически важных проектах, игнорируя устаревшие данные.

Таким образом, предложенная модификация математической модели XGBoost позволяет учитывать нестационарный характер данных в управлении ИТ-проектами. Введение адаптивного весового коэффициента $\alpha(t)$ обеспечивает приоритет наблюдений из критических фаз (тестирование) и экспоненциальное забывание устаревшей информации. Выведенные аналитические выражения для градиента и гессиана позволяют интегрировать модификацию в стандартный алгоритм XGBoost без изменения его вычислительной архитектуры. Экспериментальная верификация подтвердила, что модель способна выявлять рискованные проекты на ранних стадиях, что особенно важно для R&D-подразделений с высокой степенью неопределенности. Практическая значимость работы заключается в возможности использования разработанной модели в системах поддержки принятия решений для руководителей проектов.

Список использованных источников

1. Чен Т., Гестран К. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. – 2016. – С. 785–794.
2. Кечкина А.А., Богатиков В.Н., Ключин А.Ю. Интеллектуальный интерфейс как специализированный программный уровень для организации эффективного взаимодействия // Формирование профессиональной направленности личности специалистов – путь к инновационному развитию России. – Пенза: ПГАУ, 2025. – С. 246-249.

MODIFICATION OF THE XGBOOST ALGORITHM FOR DATA NON-STATIONARITY IN THE TASKS OF IT PROJECT RISK FORECASTING

A.A. Kechkina, V.N. Bogatikov, S. A. Sitnikov

*Tver State Technical University,
Tver, Russia*

The article addresses the problem of data non-stationarity in the task of forecasting the risk of IT project delays. The classical gradient boosting algorithm (XGBoost)

treats all observations equally, which reduces its effectiveness when conditions change and the importance of lifecycle phases varies. A modification of the XGBoost loss function is proposed by introducing an adaptive weight coefficient α_i . The modified loss function considers the significance of an observation depending on its relevance (exponential forgetting) and the criticality of the project phase. New analytical expressions for the gradient and Hessian, integrable into the algorithm, are derived. Experimental verification on data from four projects of the Advanced Development Department of ITELMA, demonstrates that the modified model increases attention to projects in the testing phase by 3.4 times, allowing risk prediction 3–4 weeks before the critical point.

Keywords: XGBoost, gradient boosting, IT project management, data non-stationarity, adaptive weights, risk forecasting.

УДК 004.65

NOSQL КАК ИНСТРУМЕНТ ГИБКОСТИ: АНАЛИЗ ДОКУМЕНТО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СУБД (MONGODB) ДЛЯ ЗАДАЧ УЧЕТА

П.С. Ковтан

*Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет),
г. Санкт-Петербург, Россия*

В условиях цифровой трансформации бизнеса требования к системам учета постоянно меняются. Традиционные реляционные базы данных (SQL) не всегда успевают адаптироваться под новые форматы данных и потребности компаний в гибкости. В данной работе рассматривается документо-ориентированный подход к хранению данных на примере СУБД MongoDB как альтернативный инструмент для автоматизации учетных задач. Предмет исследования – документо-ориентированные базы данных; объект – задачи операционного учета (заказы, товары, клиенты) в деятельности предприятия розничной торговли. Цель работы – определить границы применимости MongoDB в учетных системах и выявить условия, при которых её использование дает бизнесу преимущество в скорости разработки и адаптивности перед классическими SQL-решениями. В результате исследования предложена классификация учетных задач по критерию «потребность в гибкости схемы данных» и даны рекомендации по выбору типа СУБД в зависимости от специфики бизнес-процессов. Статья может быть полезна аналитикам, разработчикам и руководителям цифровых проектов, стоящим перед выбором технологии для автоматизации учета.

Ключевые слова: NoSQL, MongoDB, документо-ориентированные базы данных, автоматизация учета, реляционные базы данных, SQL, проектирование информационных систем.

В последние десятилетия мы наблюдаем стремительную цифровую трансформацию всех сфер экономики. Бизнес переходит в онлайн, компа-

нии обрастают мобильными приложениями, личными кабинетами и сложными CRM-системами. В этих условиях данные перестали быть просто «записями в журнале» – они стали активом, источником аналитики и основой для принятия решений. Системы учета, которые раньше выполняли исключительно регистрационную функцию, сегодня должны быть гибкими, масштабируемыми и готовыми к изменениям.

Документо-ориентированные базы данных реализуют подход *schema-on-read*. Данные хранятся в виде документов (обычно JSON или BSON), и каждый документ может иметь собственный набор полей. Коллекция документов не навязывает структуру – приложение само решает, как интерпретировать данные в момент чтения. Это кардинально меняет философию работы: разработчик больше не думает о том, «как разложить объект по таблицам», он просто сохраняет объект целиком [3].

Сравнивая два подхода, можно выделить ключевые различия. Реляционные базы данных обеспечивают строгую целостность и мощный язык запросов SQL, но платят за это сложностью масштабирования и жесткостью схемы. Документо-ориентированные базы данных, напротив, предлагают гибкость, простоту разработки и горизонтальное масштабирование, но требуют от разработчика большей дисциплины в обеспечении целостности данных на уровне приложения.

MongoDB в контексте учетных задач

MongoDB является наиболее популярным представителем класса документо-ориентированных СУБД. Её часто выбирают стартапы и крупные компании для проектов, где важна скорость вывода на рынок [4]. Рассмотрим, как её свойства соотносятся с типичными задачами операционного учета.

Первая и самая очевидная область применения MongoDB – это хранение товарных каталогов, справочников и номенклатур. В розничной торговле разные категории товаров имеют разные наборы характеристик. У холодильника – объем и количество камер, у смартфона – диагональ экрана и объем памяти, у одежды – размер и цвет. В реляционной базе данных это приводит либо к созданию десятков специализированных таблиц, либо к использованию шаблона «Entity-Attribute-Value» (EAV), который сложен в поддержке и неэффективен по производительности [2].

В MongoDB такая задача решается элегантно: каждый товар хранится как документ, содержащий только релевантные для него поля. При этом все товары находятся в одной коллекции, что упрощает поиск и фильтрацию [4]. Добавление новой категории товаров с уникальными характеристиками не требует изменения схемы базы данных – разработчик просто начинает сохранять новые документы.

Главный аргумент критиков NoSQL в контексте учета – это вопрос транзакций. Долгое время MongoDB не поддерживала ACID-транзакции на уровне нескольких документов, что делало её непригодной для сценариев, где критична согласованность данных. Например, при переводе денег между счетами или при резервировании товара в момент оформления заказа

операция должна быть атомарной: либо выполняются все действия, либо не выполняется ни одно [3].

Ситуация изменилась с выходом версии MongoDB 4.0, которая представила поддержку многодокументных транзакций. Согласно официальной документации, современные версии MongoDB позволяют выполнять ACID-транзакции, однако их производительность в высоконагруженных сценариях требует тщательного тестирования [5]. Как отмечают Дж. Хеллерштейн и М. Стоунбрейкер в работе об архитектуре высоконагруженных систем, выбор между SQL и NoSQL часто сводится к компромиссу между согласованностью, доступностью и устойчивостью к разделению (CAP-теорема) [6]. Поэтому для высоконагруженных финансовых систем с жесткими требованиями к транзакционности выбор в пользу реляционных СУБД остается более безопасным.

Рассмотрим классический пример – заказ интернет-магазина. Заказ включает в себя шапку (номер, дата, клиент, сумма) и состав (список товаров с ценами и количеством). В реляционной модели это две связанные таблицы, и для получения полной информации о заказе необходимо выполнить JOIN. При высокой нагрузке JOIN-ы становятся узким местом производительности [1].

В MongoDB заказ может быть сохранен как единый документ, содержащий вложенный массив товаров. Т. Чоудери подчеркивает, что такой паттерн (денормализация и встраивание) является ключевым при проектировании схем в MongoDB и дает ощутимый выигрыш в производительности для операций чтения [4].

```
1 {
2   "customer": "Иванов И.И.",
3   "date": "2026-03-19",
4   "items": [
5     {
6       "product": "Холодильник",
7       "price": 30000,
8       "quantity": 1
9     },
10    {
11      "product": "Чайник",
12      "price": 2500,
13      "quantity": 2
14    }
15  ],
16  "order_id": "12345"
17 }
18
19
```

Рисунок 1 – Пример документа заказа в MongoDB

Для отображения страницы заказа достаточно прочитать один документ с диска, что значительно быстрее, чем собирать данные из двух таблиц. Этот паттерн (денормализация и встраивание) является ключевым при проектировании схем в MongoDB и дает ощутимый выигрыш в производительности для операций чтения.

Сравнительный анализ MongoDB и SQL

На основе проведенного анализа можно предложить практическую матрицу выбора типа СУБД для различных учетных задач. Опыт крупных компаний, таких как eBay, которые успешно используют MongoDB для своих товарных каталогов, показывает, что документо-ориентированный подход может эффективно масштабироваться для решения задач операционного учета [7].

Сценарии, в которых MongoDB предпочтительнее:

1. Каталоги товаров и услуг с переменным набором характеристик.
2. Системы управления заказами (особенно на этапе MVP, когда структура заказа может меняться).
3. Профили пользователей и клиентов (где набор заполненных полей может варьироваться).
4. Системы сбора логов и событий (где высока интенсивность записи и структура данных не фиксирована).
5. Проекты с короткими сроками и частыми изменениями требований (стартапы, внутренние инструменты) [3].

Сценарии, в которых SQL остается безальтернативным:

1. Бухгалтерский и финансовый учет (требования к строгой целостности и соответствие стандартам).
2. Системы со сложными аналитическими отчетами, требующими множественных JOIN-ов.
3. Проекты, где целостность данных критически важна, а цена ошибки высока (банкинг, медицинские системы).
4. Системы с устоявшейся, редко меняющейся структурой данных [1].

Интересно отметить, что в современных архитектурах все чаще применяется полиглотное хранение данных (polyglot persistence) – использование разных типов СУБД для разных задач в рамках одного проекта. Как отмечает П. Гровер, такой подход позволяет использовать сильные стороны каждой технологии и строить по-настоящему гибкие системы [3].

Подводя итог данному исследованию, можно сделать следующие выводы. Цифровая трансформация предъявляет новые требования к системам учета, и гибкость становится одним из ключевых факторов успеха. Документо-ориентированные базы данных, такие как MongoDB, предоставляют бизнесу инструмент для быстрой адаптации к меняющимся условиям рынка [4].

Однако выбор в пользу MongoDB не должен быть данью моде. Это осознанное архитектурное решение, которое требует понимания компромиссов. Гибкость схемы достигается ценой ответственности за целостность данных, которая ложится на приложение. Высокая скорость чтения сложных структур достигается денормализацией, которая может привести к дублированию данных [6].

Наиболее перспективной видится стратегия гибридных решений, где реляционные и документо-ориентированные базы данных сосуществуют, решая каждая свои задачи. Такой подход позволяет использовать сильные

стороны обеих парадигм и строить по-настоящему современные, масштабируемые и адаптивные учетные системы, отвечающие вызовам цифровой экономики [3].

Результаты данной работы могут быть использованы студентами и молодыми специалистами при проектировании информационных систем, а также руководителями цифровых проектов, стоящими перед выбором технологического стека для автоматизации бизнес-процессов.

Список использованных источников

1. Дейт, К.Дж. Введение в системы баз данных: [перевод с английского] / К.Дж. Дейт. – 8-е изд. – Москва: Вильямс, 2019. – 45 с. – Текст: непосредственный.
2. Фаулер, М. Шаблоны корпоративных приложений = Patterns of Enterprise Application Architecture: [перевод с английского] / М. Фаулер. – Москва: Вильямс, 2020. – 210 с. – Текст: непосредственный.
3. Гровер, П. NoSQL: новая методология разработки / П. Гровер. – Москва: Эксмо, 2013. – 45 с. – Текст: непосредственный.
4. Чоудери, Т. MongoDB: полное руководство. Мощная и масштабируемая система управления базами данных / Т. Чоудери. – Москва: ДМК-Пресс, 2020. – 112 с. – Текст: непосредственный.
5. MongoDB 4.0 Manual / MongoDB Inc. – URL: <https://docs.mongodb.com/manual/> (дата обращения: 19.03.2026). – Текст: электронный.
6. Хеллерштейн, Дж. Архитектура высоконагруженных систем = Designing Data-Intensive Applications / Дж. Хеллерштейн, М. Стоунбрейкер. – Санкт-Петербург : Питер, 2021. – 320 с. – Текст : непосредственный.
7. Building Next-Generation Marketplace Data Platform / eBay Tech Blog. – URL: <https://tech.ebayinc.com/> (дата обращения: 19.03.2026). – Текст : электронный.

NOSQL AS A FLEXIBILITY TOOL: ANALYSIS OF DOCUMENT-ORIENTED DBMS (MONGODB) FOR ACCOUNTING TASKS

P.S. Kovtan

*Saint-Petersburg State Institute of Technology,
Saint-Petersburg, Russia*

In the context of digital business transformation, the requirements for accounting systems are constantly changing. Traditional relational databases (SQL) do not always have time to adapt to new data formats and companies' needs for flexibility. This paper examines the document-oriented approach to data storage using the MongoDB DBMS as an alternative tool for automating accounting tasks. The subject of the study is document-oriented databases; the object is operational accounting tasks (orders, goods, customers) in the activities of a retail enterprise. The purpose of the work is to determine the boundaries of MongoDB applicability in accounting systems and to identify the conditions under which its use gives business an advantage in development speed and adaptability over classical SQL solutions. As a result of the study, a classification of accounting tasks according to the criterion «need for data schema flexibility» is proposed, and recommendations are given for choosing the type of DBMS de-

pending on the specifics of business processes. The article may be useful for analysts, developers, and digital project managers facing the choice of technology for accounting automation.

Keywords: NoSQL, MongoDB, document-oriented databases, accounting automation, relational databases, SQL, information systems design.

УДК 69

МЕТОДЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ПРИ МОДЕРНИЗАЦИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

А.Д. Колосов

*Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия*

С течением времени любое здание подвергается физическому износу, приводящее к ухудшению его эксплуатационных характеристик и возникновению потенциальной опасности для людей. Одним из важнейших этапов подготовки капитального ремонта и реконструкции является техническое обследование зданий и сооружений.

Ключевые слова: здания, техническое обследование, реконструкция, капитальный ремонт, модернизация, строительные конструкции.

Значительная часть строительного фонда была возведена несколько десятилетий назад и эксплуатируется в условиях повышенных нагрузок, воздействия агрессивной среды или климатических факторов. Вследствие этого возрастает необходимость проведения капитального ремонта, реконструкции и модернизации объектов. А особенно актуальной данная проблема становится в крупных городах, где плотная застройка и ограниченность свободных территорий.

Именно техническое обследование дает возможность получить объективную информацию о фактическом состоянии объекта, определить степень физического износа конструкций, выявить скрытые дефекты и оценить возможность дальнейшей безопасной эксплуатации, в противном случае, без проведения комплексной диагностики невозможно разработать проект модернизации здания и обеспечить надежность принимаемых инженерных решений.

Техническое обследование представляет собой комплекс инженерных мероприятий, направленных на определение фактического состояния строительных конструкций, оснований, фундаментов и инженерных систем здания.

Главной целью обследования является выявление дефектов, повреждений и отклонений, способных повлиять на надежность и безопасность эксплуатации объекта.

Основными задачами технического обследования являются:

- выявление дефектов, повреждений и деформаций конструкций;
- определение причин возникновения повреждений;
- оценка степени физического износа объекта;
- определение остаточной несущей способности конструкций;
- прогнозирование дальнейшего поведения объекта при эксплуатации;
- разработка рекомендаций по ремонту, усилению или реконструкции.

Особенно актуально проведение обследований для объектов:

- с длительным сроком эксплуатации;
- после аварий и чрезвычайных ситуаций;
- при изменении функционального назначения;
- перед капитальным ремонтом;
- перед реконструкцией и надстройкой;
- при выявлении признаков деформаций и разрушений.

Таким образом, техническое обследование выступает связующим звеном между фактическим состоянием объекта и принятием инженерных решений по его дальнейшей эксплуатации.

Итак, необходимость проведения обследования обусловлена рядом факторов, где в первую очередь это естественное старение строительных материалов и конструкций. Как известно, под воздействием времени бетон теряет прочность, металлические элементы подвергаются коррозии, кирпичная кладка разрушается под влиянием влаги и перепадов температур. Дополнительное негативное влияние оказывают ошибки проектирования, нарушения технологии строительства, отсутствие своевременного ремонта и изменение эксплуатационных нагрузок.

Не менее важное значение техническое обследование приобретает при реконструкции зданий, так как изменение функционального назначения объекта, увеличение этажности или модернизация инженерных систем приводят к перераспределению нагрузок на конструкции. В таких условиях необходимо определить, способны ли существующие элементы воспринимать новые нагрузки без риска разрушения. И кроме того, техническое обследование играет важную роль в обеспечении безопасности населения, ведь многие аварийные ситуации происходят именно из-за несвоевременного выявления дефектов строительных конструкций: развитие трещин, деформаций и коррозионных процессов может длительное время оставаться незаметным, однако в определенный момент приводит к резкому снижению несущей способности здания.

В процессе исследования специалисты определяют текущее техническое состояние объекта, выявляют дефекты и повреждения конструкций, оценивают степень физического износа и остаточный ресурс здания. Одной из важнейших задач обследования является анализ соответствия объекта современным строительным нормам и требованиям безопасности, поскольку многие здания, построенные несколько десятилетий назад, сегодня не отвечают действующим требованиям пожарной безопасности и надежности инженерных систем. В подобных случаях обследование становится основой для разработки мероприятий по модернизации объекта. На осно-

вании результатов обследования принимается решение о необходимости капитального ремонта, усиления конструкций, реконструкции или вывода объекта из эксплуатации.

Одним из первых этапов технического обследования является визуальный осмотр объекта. Данный метод представляет собой анализ внешнего состояния конструкций и инженерных систем без применения сложного оборудования. Во время обследования специалисты фиксируют трещины, сколы, деформации, коррозию металлических элементов, разрушение отделочных слоев, следы увлажнения и другие признаки повреждений. Визуальный осмотр может определить наиболее проблемные участки здания и составить программу дальнейших исследований. Несмотря на относительную простоту, визуальное обследование играет важную роль, поскольку позволяет выявить очевидные дефекты и предварительно оценить степень износа объекта. Однако данный метод не всегда позволяет определить скрытые повреждения конструкций, поэтому он используется в сочетании с инструментальными исследованиями.

Геодезические исследования также являются важной частью диагностики строительных объектов, которые позволяют определить пространственное положение конструкций, выявить деформации, крены, осадки фундаментов и отклонения элементов здания от проектных параметров. А при помощи современных геодезических приборов специалисты получают высокоточные данные о состоянии объекта. Особенно важны геодезические методы при обследовании высотных зданий, мостов, тоннелей и объектов, расположенных на сложных грунтах.

Результаты геодезических измерений позволяют оценить устойчивость здания и определить динамику развития деформационных процессов. Это особенно важно при реконструкции объектов, когда изменение нагрузок может повлиять на состояние фундаментов и несущих конструкций.

Для объективной оценки технического состояния строительных конструкций часто требуется проведение лабораторных испытаний материалов, в ходе которых отбираются образцы бетона, металла, кирпича и других материалов, после чего определяются их физико-механические характеристики. Лабораторные исследования позволяют определить прочность материалов, степень коррозии, влажность, плотность и другие показатели, влияющие на надежность конструкций. Полученные данные используются при выполнении поверочных расчетов и определении остаточного ресурса здания.

Современная строительная диагностика также широко использует методы неразрушающего контроля, позволяющие исследовать конструкции без их повреждения, тем самым, обеспечивают высокую точность обследования и позволяют выявлять скрытые дефекты. Одним из наиболее распространенных методов является ультразвуковое обследование. С его помощью определяют прочность бетона, наличие внутренних трещин и пустот. А к примеру, для обследования металлических

элементов применяются радиографические методы, позволяющие выявлять скрытые дефекты сварных соединений и внутренние повреждения металла. Также широко используются тепловизионные исследования, позволяющие определить участки теплопотерь, скрытые протечки и дефекты теплоизоляции.

Развитие цифровых технологий не прошло мимо этой отрасли и существенно изменило подходы к техническому обследованию зданий и сооружений. Сегодня активно применяются лазерное 3D-сканирование, автоматизированные системы и прочих технологий. К примеру, лазерное сканирование позволяет создавать высокоточные трехмерные модели объектов, отражающие фактическое состояние конструкций. И уже полученные данные используются для анализа деформаций, разработки проектов реконструкции и контроля качества строительных работ.

Особенно актуально обследование при реконструкции исторических зданий и сооружений. В подобных случаях необходимо не только обеспечить надежность объекта, но и сохранить его архитектурную ценность. Примером может служить реконструкция старинных мостов и исторических зданий, где техническое обследование позволяет определить оптимальные способы усиления конструкций без нарушения исторического облика объекта.

Но в условиях активного развития городов и старения строительного фонда значение технического обследования продолжает возрастать, оно и становится основой эффективного управления жизненным циклом зданий и важнейшим элементом обеспечения безопасности инфраструктуры.

Список использованных источников

1. Леденёв, В.В. Обследование и мониторинг строительных конструкций зданий и сооружений: учебное пособие / В.В. Леденёв, В.П. Ярцев. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2017. – 252 с.
2. Обследование технического состояния зданий и сооружений: учебное пособие / М.В. Яковлева, Е.А. Фролов, А.Е. Фролов, К.И. Гималетдинов. – Самара: СГАСУ, 2011.

METHODS OF TECHNICAL INSPECTION DURING MODERNIZATION OF CONSTRUCTION FACILITIES

A.D. Kolosov

*St. Petersburg Polytechnic University Peter the Great University,
St. Petersburg, Russia*

Over time, any building is subject to physical deterioration, leading to deterioration of its operational characteristics and the emergence of a potential danger to people. One of the most important stages in the preparation of major repairs and reconstruction is the technical inspection of buildings and structures.

Keywords: *buildings, technical inspection, reconstruction, major repairs, modernization, building structures.*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ КОНИЧЕСКИХ ФРИКЦИОННЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ОСЕВОЙ НАГРУЗКИ

Д.В. Кочетков, А.М. Пучков, Д.Ю. Демидов

*Пензенский государственный университет,
г. Пенза, Россия*

В статье представлены результаты исследования эксплуатационных характеристик конических фрикционных соединений при передаче осевой нагрузки. Установлено, что для повышения прочности соединения необходимо упрочнять участок, прилегающий к большему диаметру, например путем применения анаэробных материалов.

Ключевые слова: коническое фрикционное соединение, сборка, анаэробный материал, прочность, напряжение, перемещение.

В настоящее время при сборке различных технологических машин широко применяются соединения деталей с натягом (СН), которые положительно себя зарекомендовали при передаче осевой нагрузки и крутящего момента. Однако все же СН имеют и недостатки, связанные с тем, что натяг в соединении цилиндрических деталей в стандартных посадках изменяется до 4 раз, это вызвано не только условиями контактирования и трения деталей, но и допускаемыми изменениями действительных размеров вала и втулки. Что в свою очередь оказывает влияние на прочность при эксплуатации. Еще одним существенным недостатком является сам процесс сборки СН путем запрессовки [1–5].

В конических фрикционных соединениях (КФС) величиной натяга, а соответственно и прочностью можно управлять за счет осевого положения соединяемых деталей. Кроме того применение КФС позволяет обеспечить самоцентрируемость, быструю разборку и сборку, а также герметичность. Однако недостаточное количество проведенных исследований ограничивает области применения КФС в современном машиностроении.

При длительной эксплуатации обеспечение прочностных и других характеристик КФС может быть дополнительно достигнуто за счет сборки соединения с анаэробными материалами (АМ) [1–7].

Исходные данные при моделировании КФС (см. рисунок 1) представлены в таблице 1. Исследования КФС проводились методом конечных элементов в САЕ-системе *SolidWorks Simulation* [1–7].

Таблица 1 – Исходные данные при моделировании КФС

Наибольший диаметр соединения	$D_{\max} = 29 \text{ мм}$
Наименьший диаметр соединения	$D_{\min} = 27 \text{ мм}$
Наружный диаметр втулки	$D_1 = 50 \text{ мм}$
Длина соединения	$l = 20 \text{ мм}$
Величина натяга в соединении	$N = 0,048 \text{ мм}$

Материал вала и втулки	сталь 30Х
Коэффициент трения в зоне контакта деталей	$f = 0,1$
Осевая нагрузка (давление на торцах вала) со стороны $D_{\max}$	$F_1 = 20$ МПа
Осевая нагрузка (давление на торцах вала) со стороны $D_{\min}$	$F_2 = 23$ МПа

Величина разного давления F_1 и F_2 , при исследованиях, обусловлена необходимостью задания одинаковой осевой силы, которая назначалась 60% от максимальной расчетной осевой нагрузки на соединение).

На рисунке 1 представлена схема нагружения КФС осевой нагрузкой F .

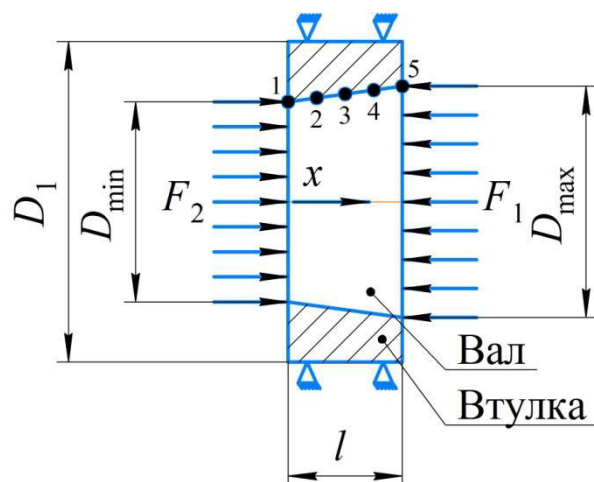


Рисунок 1 – Схема нагружения КФС осевой нагрузкой F

Построение трехмерных моделей деталей вала (рисунок 2, а) и втулки (рисунок 2, б), а также сборка КФС (рисунок 2, в) выполнялась в САД-системе *SolidWorks*.

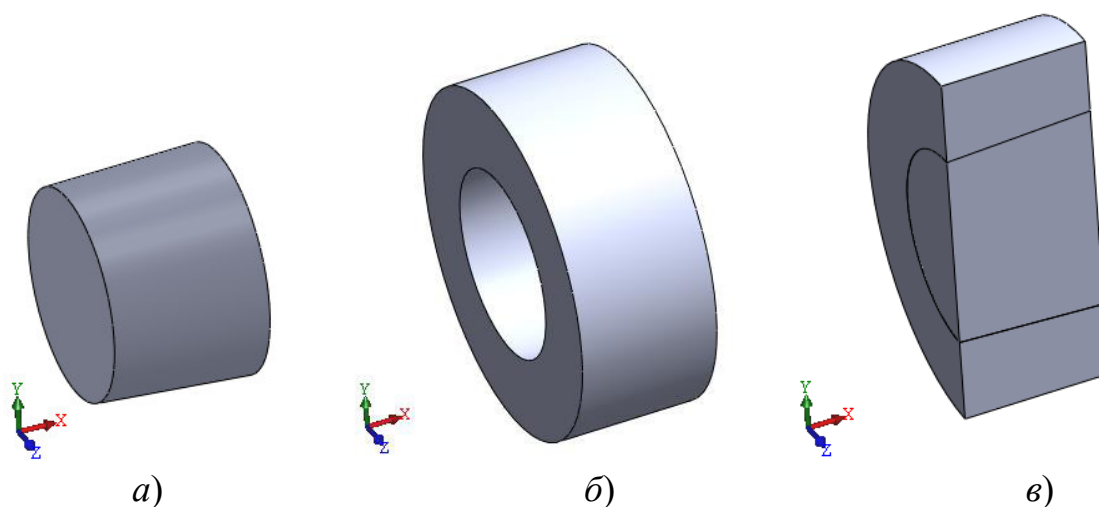


Рисунок 2 – Трехмерные модели деталей и сборка КФС

На рисунке 3 показана 3D-модель КФС и граничные условия: фиксация втулки по диаметру D_1 , осевая нагрузка приложена к валу со стороны меньшего диаметра $D_{\min}$. Также проводились исследования

соединения при приложении осевой нагрузки к валу со стороны большего диаметра $D_{\max}$.

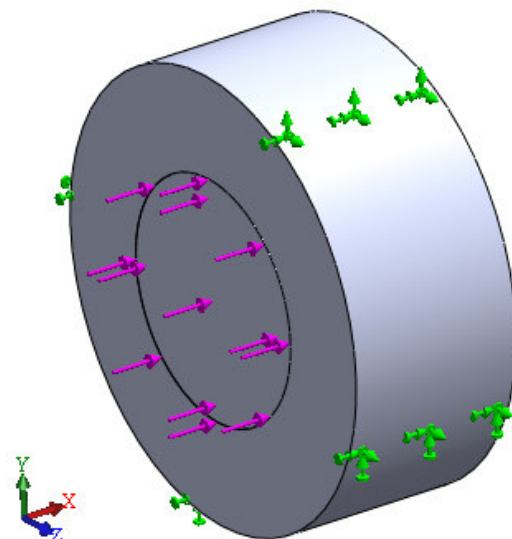


Рисунок 3 – Расчетная модель

Определялись суммарные напряжения по Мизесу по длине соединения (рисунок 4).

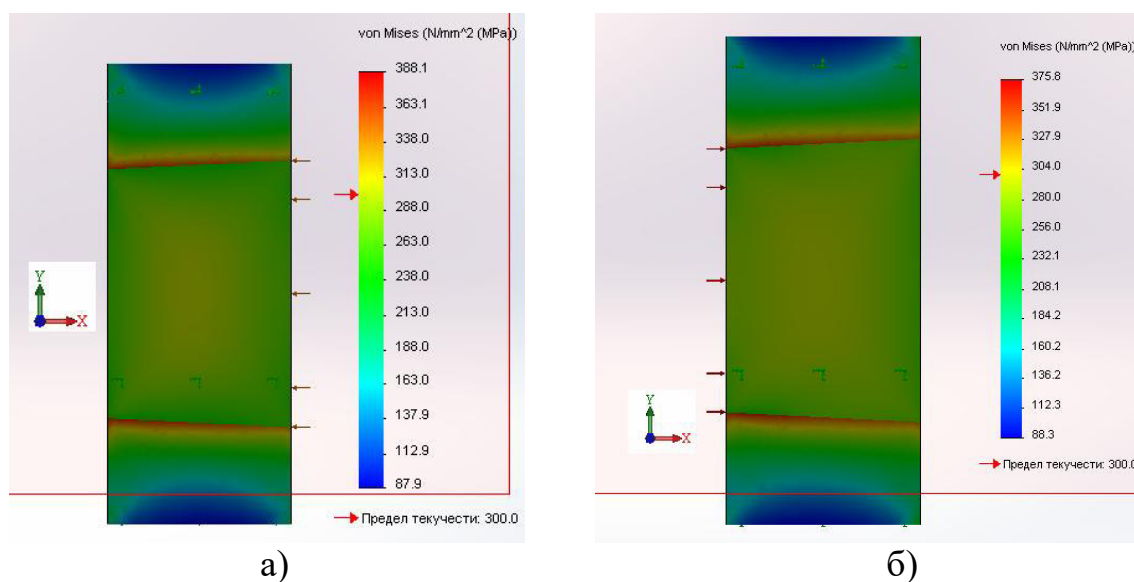


Рисунок 4 – Суммарные напряжения по длине КФС

Установлено, что после сборки втулка более напряжена, чем вал. Напряжения на втулке увеличивались на 2,3%, когда прикладывалась осевая нагрузка $F_1 = 20$ МПа (рисунок 4, а), что можно объяснить увеличением распорного усилия из-за клиновидности поверхности. И уменьшались на 3%, когда прикладывалась осевая нагрузка $F_2 = 23$ МПа (рисунок 4, б). При этом суммарные напряжения на валу практически не меняются.

Также при исследовании КФС определялись перемещения по оси x по длине соединения (рисунок 5).

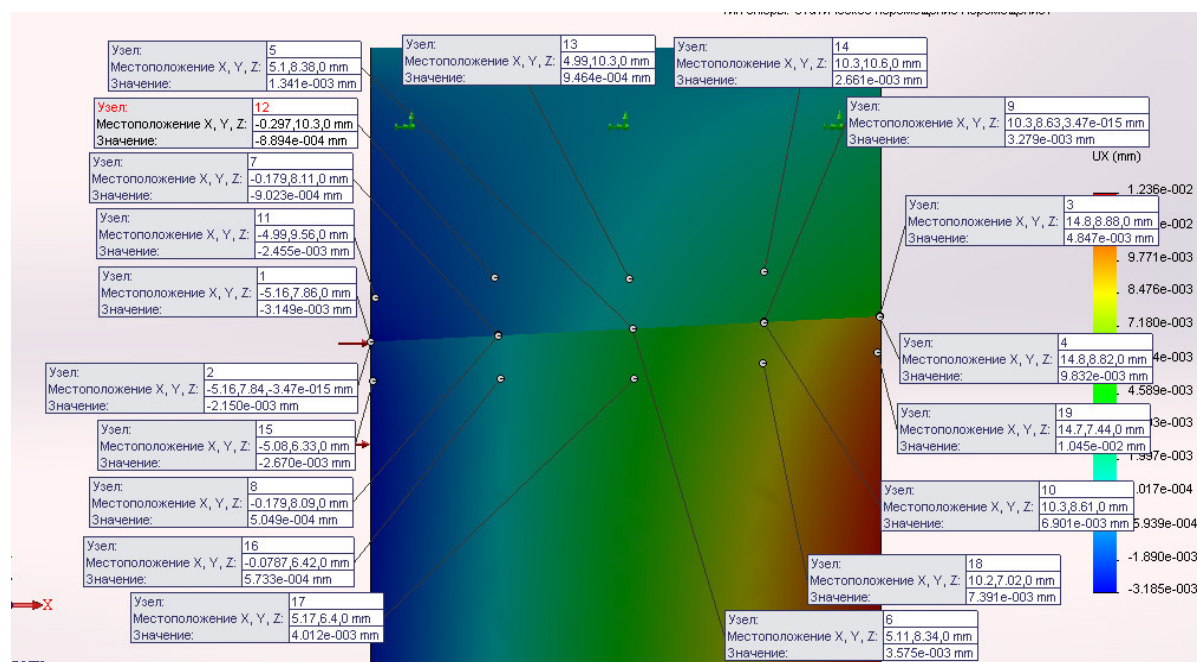


Рисунок 5 – Перемещения по оси x по длине КФС

Установлено, что при действии нагрузки F_1 или F_2 наиболее нагруженным участком КФС является участок со стороны большего диаметра $D_{\max}$ (точки 4 и 5 (рисунок 1 и 5)). Это связано с тем, что на участке со стороны меньшего диаметра $D_{\min}$ контактное давление выше.

Таким образом, для повышения прочности соединения необходимо упрочнять участок, прилегающий к большему диаметру, например с помощью АМ [1–7].

Список использованных источников

1. Воячек, И.И. Новая методика проектирования соединений с натягом при применении упрочняющей технологии / И.И. Воячек, Д.В. Кочетков, А.Д. Тарханов, Ю.В. Истомина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2024. – № 4. – С. 118–129. – DOI: 10.21685/2072-3059-2024-4-10, EDN: YLYJST.
2. Воячек, И.И. Избирательное упрочнение соединений с натягом при сборке с анаэробными материалами / И.И. Воячек, Д.В. Кочетков, С.Г. Митясов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2015. – № 2 (34). – С. 192–204. – EDN: UISFNF.
3. Воячек, И.И. Избирательное упрочнение соединений с натягом при сборке деталей путем запрессовки / И.И. Воячек, Д.В. Кочетков, С.Г. Митясов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 3 (47). – С. 113–123. – DOI: 10.21685/2072-3059-2018-3-11, EDN: VBGEON.
4. Воячек, И.И. Технологическое обеспечение циклической прочности соединений с натягом, нагруженных изгибающей силой / И.И. Воячек, Д.В. Кочетков, С.Г. Митясов, В.С. Шинкарев // Техника и технология современных произ-

водств: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции. – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2019. – С. 14–19. – EDN: ZТОМСТ.

5. Кочетков, Д.В. Исследование прочности соединений с натягом при сборке с анаэробными материалами / Д.В. Кочетков, И.И. Воячек, И. Шрим // Материалы и технологии XXI века: сборник статей XX Международной научно-технической конференции. – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2024. – С. 23–28. – EDN: IBIJZD.

6. Воячек, И.И. Особенности формирования контакта деталей при сборке спиралевидного фрикционно-профильного соединения / Воячек И.И., Кочетков Д.В., Грошев А.А. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2024. – № 4 (164). – С. 32–41. – DOI: 10.26730/1999-4125-2024-4-32-41, EDN: CDMIPG.

7. Воячек, И.И. Обеспечение функциональных свойств комбинированного резьбогладкого соединения при сборке с применением анаэробных материалов / И.И. Воячек, Д.В. Кочетков, О.А. Низов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2025. – № 5 (171). – С. 5–16. – DOI: 10.26730/1999-4125-2025-5-5-16, EDN: UDQUQI.

STUDY OF THE STRENGTH OF CONICAL FRICTION JOINTS UNDER AXIAL LOAD TRANSMISSION

D.V. Kochetkov, A.M. Puchkov, D.Yu. Demidov

*Penza State University,
Penza, Russia*

This article presents the results of a study examining the performance characteristics of conical friction joints under axial load transmission. It was found that to increase joint strength, the area adjacent to the larger diameter must be reinforced, for example, by using anaerobic materials.

Keywords: conical friction joint, assembly, anaerobic material, strength, stress, displacement.

УДК 621.81

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНИЧЕСКИХ ФРИКЦИОННЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Д.В. Кочетков, Д.Ю. Демидов, А.М. Пучков

*Пензенский государственный университет,
г. Пенза, Россия*

В статье представлены результаты исследования эксплуатационных характеристик конических фрикционных соединений, собранных с применением анаэробных материалов и без них. Установлено, что прочность конических соединений при сборке с анаэробными материалами повышается.

Ключевые слова: коническое фрикционное соединение, сборка, анаэробный материал, крутящий момент, прочность, напряжение.

Применение конических фрикционных соединений (КФС) в современном машиностроении обусловлено рядом преимуществ, обеспечивается:

- самоцентрируемость;
- возможность регулирования зазора и натяга с помощью изменения осевого расположения деталей;
- быстрая разборка и сборка;
- герметичность и т.д.

Однако исследований эксплуатационных характеристик КФС проведено не достаточно, также практически отсутствуют исследования данного типа соединений при сборке с анаэробными материалами, которые, как известно [1–7] способствуют повышению прочности и жесткости различных соединений деталей машин.

Передача эксплуатационной нагрузки (осевое усилие, крутящий момент) у конических фрикционных неподвижных соединений деталей осуществляется за счет силы трения сопрягаемых поверхностей.

При длительной эксплуатации обеспечение прочностных и других характеристик КФС может быть достигнуто за счет сборки соединения с анаэробными материалами (АМ) [1–7].

Исследования проводились методом конечных элементов в САЕ-системе *SolidWorks Simulation*, наличие АМ в зоне контакта деталей учитывалось величиной коэффициента трения f [1–7].

Исходные данные при моделировании КФС (см. рисунок 1):

- $D_{\max} = 29$ мм; $D_{\min} = 27$ мм; $D_1 = 50$ мм; $l = 20$ мм;
- натяг в соединении – $N = 0,048$ мм;
- материал деталей сталь 30Х;
- крутящий момент $M_{\text{кр}} = 150$ Нм;
- коэффициент трения в зоне контакта деталей – $f = 0,1$ для соединений собранных без АМ и $f = 0,3$ с АМ.

На рисунке 1 представлена схема нагружения КФС крутящим моментом.

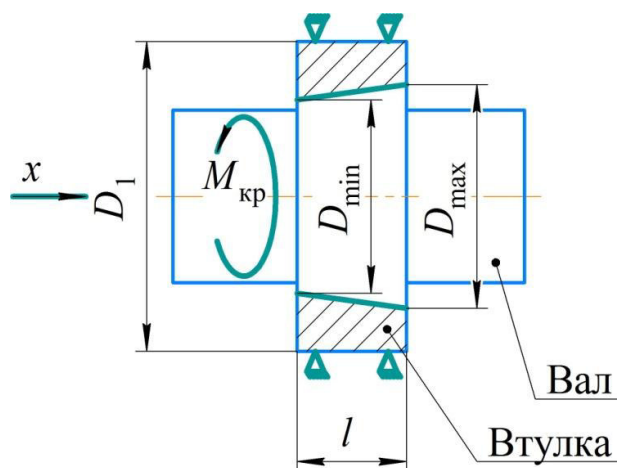


Рисунок 1 – Схема нагружения КФС крутящим моментом $M_{\text{кр}}$

Построение трехмерных моделей деталей вала (рисунок 2, а) и втулки (рисунок 2, б), а также сборка КФС (рисунок 2, в) выполнялась в CAD-системе *SolidWorks*.

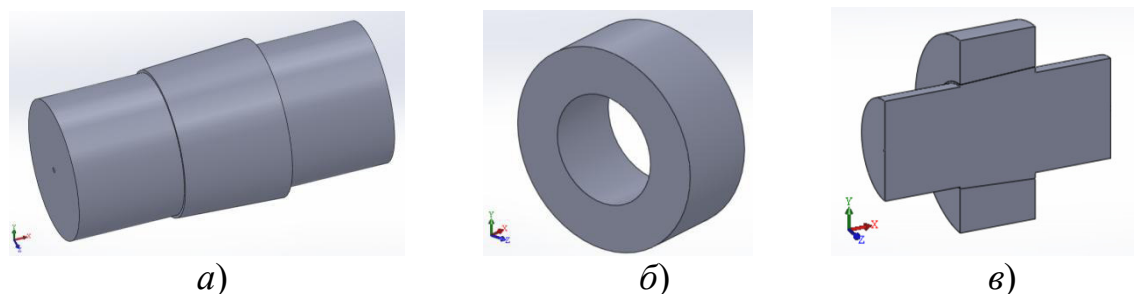


Рисунок 2 – Трехмерные модели деталей и соединения

На рисунке 3 показана 3D-модель КФС и граничные условия: фиксация втулки по диаметру D_1 , крутящий момент приложен к валу со стороны меньшего диаметра $D_{\min}$. Также проводились исследования соединения при приложении крутящего момента к валу со стороны большего диаметра $D_{\max}$.

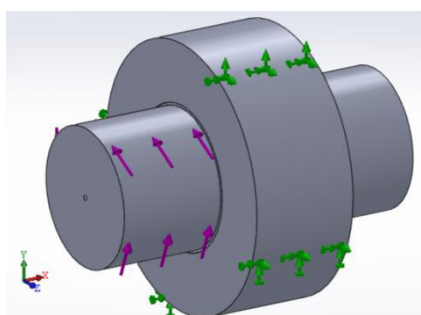
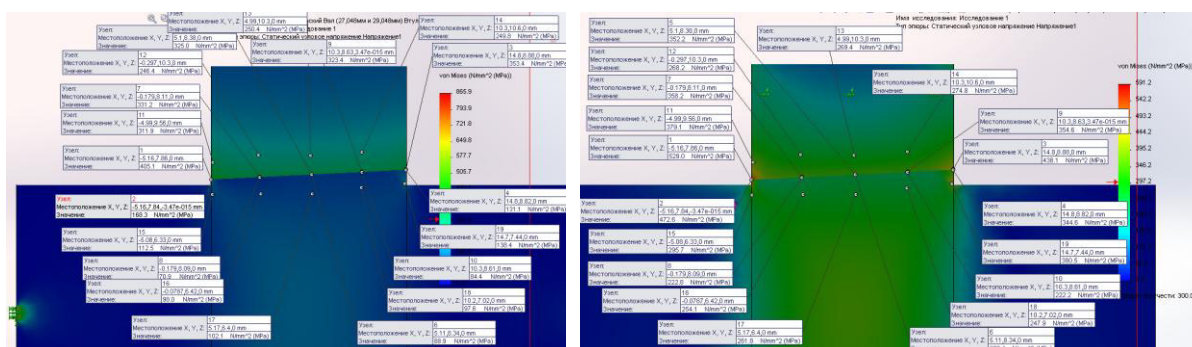


Рисунок 3 – Расчетная модель

Определялись суммарные напряжения по Мизесу по длине соединения (рисунок 4).



а) без АМ, $M_{кр} = 0$

б) с АМ, $M_{кр} = 150 \text{ Нм}$

Рисунок 4 – Суммарные напряжения по длине КФС

Таким образом, в работе исследовались следующие варианты сборки КФС:

- 1) сборка КФС без АМ ($f = 0,1$), $M_{кр} = 0$;
- 2) сборка КФС с АМ ($f = 0,3$), $M_{кр} = 0$;
- 3) сборка КФС без АМ ($f = 0,1$) с $M_{кр} = 150\text{Нм}$ (крутящий момент приложен к валу со стороны меньшего диаметра $D_{\min}$);
- 4) сборка КФС с АМ ($f = 0,3$) с $M_{кр} = 150\text{Нм}$ (крутящий момент приложен к валу со стороны меньшего диаметра $D_{\min}$);
- 5) сборка КФС без АМ ($f = 0,1$) с $M_{кр} = 150\text{Нм}$ (крутящий момент приложен к валу со стороны большего диаметра $D_{\max}$);
- 6) сборка КФС с АМ ($f = 0,3$) с $M_{кр} = 150\text{Нм}$ (крутящий момент приложен к валу со стороны большего диаметра $D_{\max}$).

Анализ полученных данных позволил сделать следующие выводы:

1. Установлено, что после сборки втулка более напряжена, чем вал; изменение $f = 0,1 \dots 0,3$ приводит к незначительному перераспределению напряжений: на втулке наблюдается увеличение на 5,1%, на валу – уменьшение на 15,7% (варианты сборки 1 и 2);

2. Установлено, что при приложении крутящего момента $M_{кр}$ напряжения существенно возрастают: на валу увеличиваются до 2,61...3,11 раза при $f = 0,1$ и до 2,86...3,19 раза при $f = 0,3$; на втулке возрастают до 1,08...1,31 раза при $f = 0,1$ и до 1,07...1,31 раза при $f = 0,3$ (варианты сборок 3...6);

3. Наибольшие суммарные напряжения возникают со стороны меньшего диаметра $D_{\min}$ (варианты сборок 3 и 4), это необходимо учитывать при проектировании КФС.

Таким образом, применение АМ при сборке КФС позволяет повысить прочность и жесткость соединений при длительной эксплуатации.

Список использованных источников

1. Воячек, И.И. Новая методика проектирования соединений с натягом при применении упрочняющей технологии / И.И. Воячек, Д.В. Кочетков, А.Д. Тарханов, Ю.В. Истомина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2024. – № 4. – С. 118–129. – DOI: 10.21685/2072-3059-2024-4-10, EDN: YLYJST.

2. Воячек, И.И. Особенности формирования контакта деталей при сборке спиралевидного фрикционно-профильного соединения / Воячек И.И., Кочетков Д.В., Грошев А.А. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2024. – № 4 (164). – С. 32–41. – DOI: 10.26730/1999-4125-2024-4-32-41, EDN: CDMIPG.

3. Воячек, И.И. Избирательное упрочнение соединений с натягом при сборке с анаэробными материалами / И.И. Воячек, Д.В. Кочетков, С.Г. Митясов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2015. – № 2 (34). – С. 192–204. – EDN: UISFNF.

4. Воячек, И.И. Избирательное упрочнение соединений с натягом при сборке деталей путем запрессовки / И.И. Воячек, Д.В. Кочетков, С.Г. Митясов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 3 (47). – С. 113–123. DOI: 10.21685/2072-3059-2018-3-11, EDN: VBGEON.

5. Воячек, И.И. Обеспечение функциональных свойств комбинированного резьбогладкого соединения при сборке с применением анаэробных материалов / И.И. Воячек, Д.В. Кочетков, О.А. Низов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2025. – № 5 (171). – С. 5–16. – DOI: 10.26730/1999-4125-2025-5-5-16, EDN: UDQUQI.

6. Воячек, И.И. Технологическое обеспечение циклической прочности соединений с натягом, нагруженных изгибающей силой / И.И. Воячек, Д.В. Кочетков, С.Г. Митясов, В.С. Шинкарев // Техника и технология современных производств: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции. – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2019. – С. 14–19. – EDN: ZTOMCT.

7. Кочетков, Д.В. Исследование прочности соединений с натягом при сборке с анаэробными материалами / Д.В. Кочетков, И.И. Воячек, И. Шрим // Материалы и технологии XXI века: сборник статей XX Международной научно-технической конференции. – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2024. – С. 23–28. – EDN: IBIJZD.

INVESTIGATION OF OPERATIONAL CHARACTERISTICS CONICAL FRICTION JOINTS

D.V. Kochetkov, D.Yu. Demidov, A.M. Puchkov

*Penza State University,
Penza, Russia*

This article presents the results of a study examining the performance characteristics of conical friction joints assembled with and without anaerobic materials. It was found that the strength of the conical joints increases when assembled with anaerobic materials.

Keywords: *conical friction joint, assembly, anaerobic material, torque, strength, stress.*

УДК 629.7

ОСОБЕННОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТРОСОВОЙ ПРОВОДКИ УПРАВЛЕНИЯ ВЕРТОЛЕТА В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ

К.А. Курбанов, Н.В. Рогов

*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»
г. Воронеж, Россия*

В статье приведен краткий обзор оперативного ремонта гибкой системы управления вертолета. Рассмотрен вопрос: насколько безопаснее и эффективнее применение разработанных и предложенных приспособлений для оперативного ремонта гибкой системы управления вертолета.

Ключевые слова: *Арктика, воздушное судно, трос, коррозия, оперативный ремонт, вертолет.*

Зона российской Арктики представляет собой стратегическую важность для развития страны [1]. В северной части Арктики проходит Северная государственная граница России, которая является самой растянутой и

большой в мире. Вдоль побережья Арктики проходит Северный морской путь. Он обеспечивает снабжение топливом, оборудованием, продовольствием и другими товарами в районы Крайнего Севера, а также по нему транспортируют экспортно-импортные и транзитные грузы, что укрепляет геополитическую позицию России.

С 1932 года регулярная навигация по Северному морскому пути позволила в кратчайшие сроки построить маяки, полярные станции и порты на побережье Арктики, что способствовало улучшению инфраструктуры Арктики. С середины XX века в этом регионе производят добычу полезных ископаемых и строят крупные инфраструктурные объекты.

Доставка грузов и товаров, а также перевозка местных жителей и людей, работающих вахтовым методом, производятся различными видами транспорта: автомобильным, воздушным, железнодорожным и водным (рисунок 1) [2].

На рисунке 1 наглядно видно, что в Арктических регионах железнодорожная сеть слабо развита, а в центральной и восточной части Арктики она совсем отсутствует. Морским транспортом перевозки осуществляют в основном только в период навигации с мая по октябрь, а автомобильным — летом и зимой.

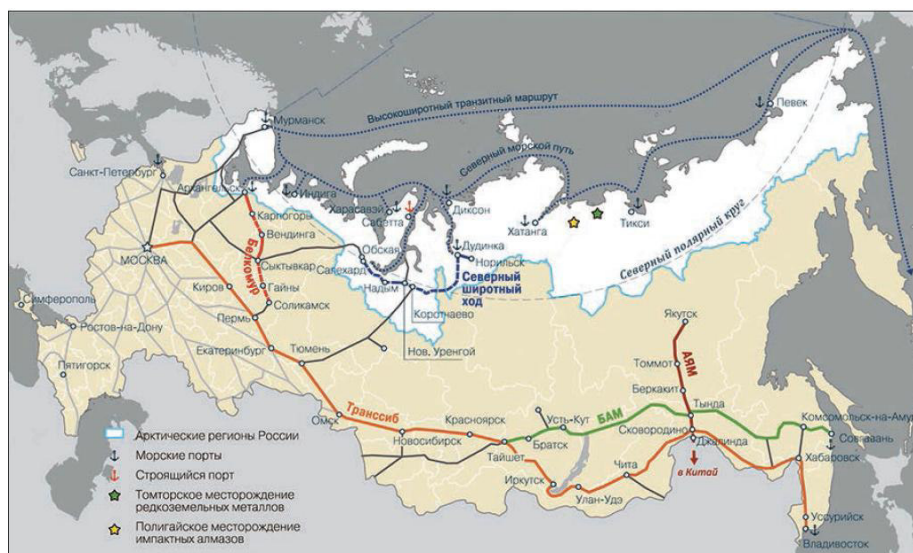


Рисунок 1 – Развитие железнодорожной и морской инфраструктур Арктики и Сибири [5]

Авиационный транспорт является единственным видом транспорта, который позволяет осуществлять доставку грузов, товаров и пассажиров в любое время года, поэтому он имеет огромное значение для восточного Арктического региона.

Способность вертолетов к вертикальному взлету и посадке на ограниченных площадках обуславливает их возрастающую конкурентоспособность в сфере грузовых и пассажирских перевозок по сравнению с самолетами. Вертолеты в силу своей универсальности применяются для решения

широкого круга задач, и зачастую становятся единственным средством обеспечения и поддержки многообразной деятельности в Арктическом регионе особенно в осенне-весенний период.

Оптимальная экономическая эффективность вертолетов достигается на расстояниях до 500 км. Эксплуатация вертолетов возможна при сверхнизких температурах наружного воздуха, что позволяет им осуществлять снабжение и спасательные операции на дрейфующих льдинах.

При эксплуатации вертолета в силу различных причин элементы его конструкции получают различные повреждения, которые необходимо устранять в полевых условиях на безангарной площадке, а иногда и на промежуточном аэродроме.

В практическом решении задачи стабилизации скорости полета воздушного судна особую роль играют системы управления тросовой проводки и жестких тяг [3]. В системе управления тросовой проводки вертолета применяются авиационные тросы, которые обладают оптимальным соотношением прочности, гибкости, погонного веса и диаметра. Конструкция авиационных тросов характеризуется количеством прядей, числом и диаметром проволок в пряди, типом сердечника и способом свивки.

Техническое обслуживание вертолетов включает обязательный контроль системы управления тросовой проводки. Ввиду подверженности тросов износу под воздействием атмосферных факторов, их проводка подлежит осмотровым работам каждые 50 часов налета. При осмотре внимание уделяется зонам прохождения тросов через ролики и цельности тандера, а также отсутствию коррозии. Износ троса в местах перегиба на роликах проявляется в виде ослабления свивки, изменения диаметра по всей длине и заершенности (обрыва отдельных проволок).

В условиях интенсивной эксплуатации вертолета, требующей минимизации времени восстановления, применяются оперативные методы ремонта. Для этих целей были разработаны технологии и специализированные приспособления для оперативного ремонта гибкой системы управления вертолетом, которые хранятся в инструментальном ящике войскового ремонтного комплекта.

Процесс заплётки троса на коуш требует удержания троса рукой на опоре и осторожного введения острия шила под его пряди. Необходимо проявлять внимательность, чтобы не повредить пряди или отдельные проволоки. При заплетке троса на коуш было замечено, что механики-левши затрудняются при проталкивании шила под пряди.

При исследовании на предмет дефектов в виде повреждений проволок в пряди при заплетке троса на коуш было зафиксировано, что из 50 тросов 5 имеют дефект в виде повреждений проволок в прядей. Происходит это из-за того, что механики-левши с левой стороны проталкивают шило по ходу свивки. Анализ показал, что личный состав в среднем состоит из 12 % левшей. Также было выявлено, что механики-левши в возрасте 45 лет хорошо работают как левой, так и правой рукой. В советское время в школе учеников-левшей переучивали на правшей. В настоящее время в школе учеников-

левой не переучивают и поэтому правой рукой им неудобно работать. Для устранения этого недостатка было предложено применять приспособление в виде коушдержателя. Коушдержатель – это специальный элемент крепления различной формы, предназначенный для надежного удержания канатов и тросов из стали. Коушдержатель не только прижимает трос к коушу, но при поворачивании его на 90° пряди раздвигаются в тросу. Это дает возможность механику-левше вводить острие шила без усилия, не повредив проволоки в прядях. Был произведен хронометраж заплетки троса на коуш с использованием приспособлений всеми механиками. Механики в среднем на 30 минут быстрее произвели заплетку троса на коуш.

Таким образом, для ремонта тросовой проводки управления вертолетом были разработаны простые технологии и приспособления. Они не требуют дорогостоящего оборудования, высокой квалификации специалистов и отличаются малым весом. Приспособления для сращивания тросовой проводки обеспечивают не только быстрый и качественный ремонт, но и возможность регулировки проводки. Все приспособления и инструмент были укомплектованы в инструментальный ящик общим весом 3 кг. Разработанный комплект инструмента позволяет уменьшить время выполнения восстановительных работ и повысить качество при ремонте тросовой проводки управления вертолетом. Проведенный расчет показывает, что комплект инструмента удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к авиаремонтным мастерским.

Список использованных источников

1. Петров, А.М. Арктическая зона Российской Федерации: социально-экономическое развитие и возникающие проблемы / А.М. Петров, О.А. Петрова // Экономические науки. – 2022. – № 213. – С. 162–166. – DOI 10.14451/1.213.162. – EDN VCUHYS.
2. Арктические транспортные магистрали на суше, акваториях и в воздушном пространстве / В.М. Грузинов, Ю.В. Зворыкина, Г.В. Иванов [и др.] // Арктика: экология и экономика. – 2019. – № 1(33). – С. 6–20. – DOI 10.25283/2223-4594-2019-1-6-20. – EDN GKYZOW..
3. Балякин М.С. Формирование модели механической проводки управления тягой двигателей в задаче автоматической стабилизации скорости полета самолета / М.С. Балякин // Навигация и управление летательными аппаратами. – 2025. – № 51. – С. 89–109. – EDN ZTYEHQ

FEATURES OF RESTORATION OF HELICOPTER CONTROL CABLE WIRING IN FIELD CONDITIONS

K.A. Kurbanov, N.V. Rogov

*Military Training and Research Center of the Air Force «Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin»
Voronezh, Russia*

The article provides a brief overview of the operational repair of the helicopter's flexible control system. The question of how much safer and more effective it is to use the

developed and proposed devices for the operational repair of the helicopter's flexible control system is considered.

Keywords: Arctic, aircraft, cable, corrosion, operational repair, helicopter.

УДК 631.171

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Д.О. Лебедев, С.С. Ус, Е.Е. Кузнецов

*Дальневосточный государственный аграрный университет,
г. Благовещенск, Россия*

В статье рассматривается возможность применения системы обогрева аккумуляторов беспилотных летательных аппаратов как способ повышения эффективности их использования в агропромышленном комплексе и расширения эксплуатационных параметров устройства, а также представлено техническое решение поставленной задачи.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, температурная адаптация, конструкция, эффективность.

Применение беспилотных летательных аппаратов в агропромышленном комплексе (АПК) имеет ряд ограничений, обусловленных особенностями их конструкции, выполняемых задач и регламентными условиями. Вместе с тем спектр решаемых задач в современном АПК расширяется вследствие развития рынка сельскохозяйственных дронов, что требует своевременной адаптации уровня технической оснащенности с учётом требуемых характеристик [1,2].

Что возможно как на этапе проектирования, так и при непосредственной доработке в хозяйствах [3]. Так как существуют специализированные задачи, для эффективного выполнения которых необходимо использование расширенных конструктивных решений.

Таким образом актуализируется необходимость в разработке беспилотных летательных аппаратов с расширенными характеристиками, адаптированными для низкотемпературного использования, что позволит использовать БПЛА в большем температурном диапазоне. При чём БПЛА должно обладать высокой термической устойчивостью, при условии сохранения рабочих характеристик в процессе полёта [4].

Для чего, в виде примера, может быть предусмотрена система обогрева аккумулятора, исполнение которого может быть реализовано в виде чехла с интегрированными нагревательными элементами, который изготавливается из негорючего материала и обеспечивается энергией для обогрева с помощью установленных на проекции аппарата ветрогенераторов.

Температура регулируется входным контроллером на плате, исключая возможность перегрева и выхода из строя аккумулятора. Ниже приведена

принципиальная структурная схема БПЛА предлагаемой конструкции (рисунки 1а-1в).

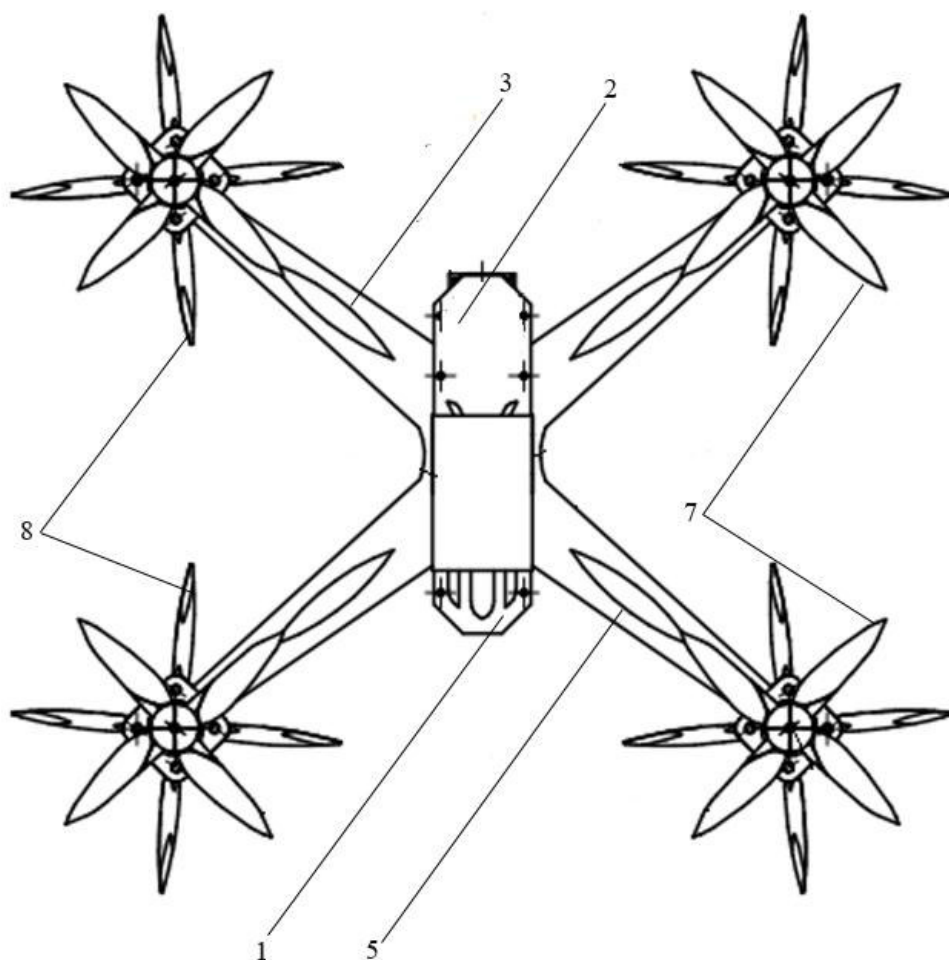


Рисунок 1а – Принципиальная схема беспилотного летательного аппарата для низкотемпературного использования (вид сверху)

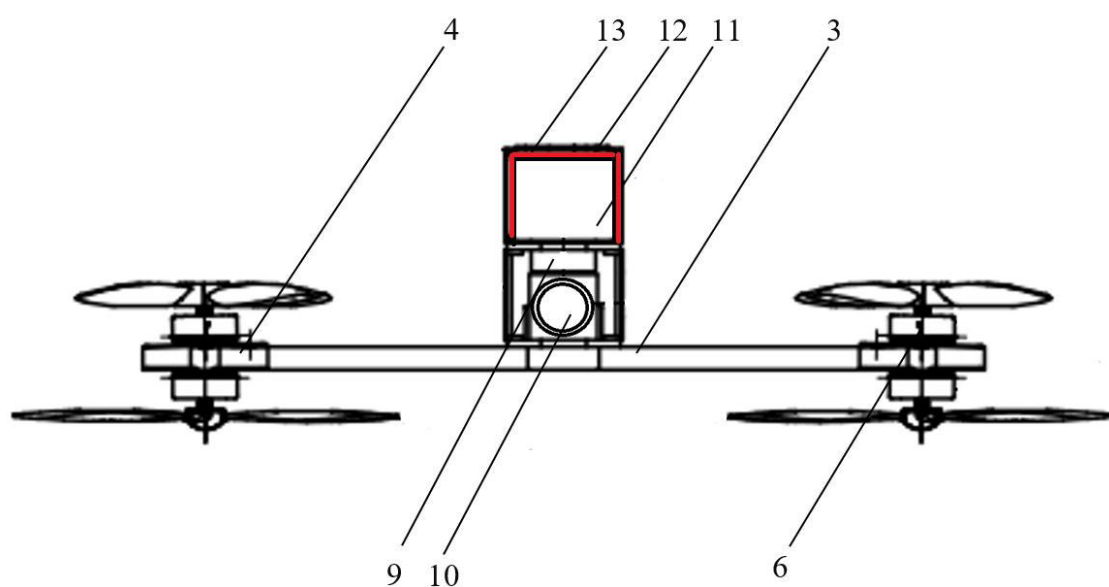


Рисунок 1б – Принципиальная схема беспилотного летательного аппарата для низкотемпературного использования (вид фронтальный)

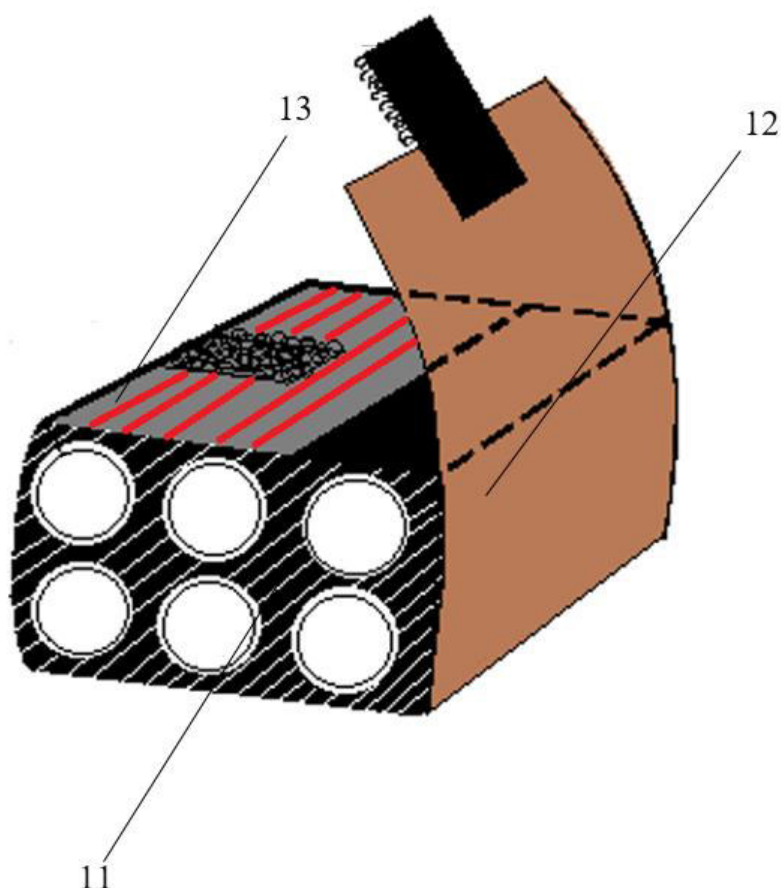


Рисунок 1в – принципиальная схема литий-полимерного аккумулятора с тепловетрозащитным чехлом и встроенным в чехол нагревательным элементом: 11 – блок аккумуляторных батарей, 12 – ветрозащитное полотно, 13 – негорючее полотно

Предлагаемое техническое решение теоретически позволит расширить диапазон эксплуатационных температур, увеличить время полезного использования БПЛА, повысить ресурс используемой аккумуляторной батареи (АКБ), так как АКБ разряд АКБ будет осуществлять в щадящем режиме, без локальных перегревов или местных охлаждений. На указанное предложение направлена заявка в ФИПС на получение патента РФ на изобретение № 2025132427.

При запуске беспилотного летательного аппарата, возникающий при вращении лопастей поток воздуха создаёт подъёмную силу, необходимую для осуществления полёта БПЛА и реактивный воздушный поток, направленный вертикально вниз на зависимые лопасти электроветрогенераторных установок. При этом сила, создаваемая реактивным потоком, обеспечивает вращение лопастей электроветрогенераторных установок и возникновение тока в цепи электроснабжения нагревательного элемента, мощность которого регулируется управляющим контроллером. В ходе чего выделившаяся мощность преобразуется в тепловую энергию посредством прохождения через замкнутый контур электрической цепи нагревательного элемента, которая удерживается на поверхности аккумулятора тепловетрозащитным чехлом, позволяя создавать комфортную рабочую темпе-

ратуру аккумулятора, не допуская его переохлаждения и снижения показателей токоотдачи аккумулятора.

При этом дополнительная мощность, получаемая от электроветрогенераторных установок, но не расходуемая на нагрев нагревательного элемента вследствие достижения оптимальной температуры аккумулятора, управляющим контроллером направляется на подзарядку аккумулятора и восполнение затрачиваемой энергии.

В общем случае использование предлагаемого изобретения – беспилотного летательного аппарата для низкотемпературного использования, реализующего принципы преобразования энергии набегающего и реактивного потока воздуха в электрический ток с помощью электроветрогенераторов, обладающего простотой изготовления и сборки, повышенной продолжительностью времени полезного использования БПЛА при проведении воздушных работ, высокими аэродинамическими качествами конструкции, расширенным эксплуатационным диапазоном температур применения, увеличенным ресурсом используемой аккумуляторной батареи и большей эффективностью используемых пропеллеров, может быть легко интегрировано в существующие технические системы, технологии и средства, что позволит снизить материальные затраты на проведение работ с использованием беспилотных авиационных систем в различных температурных диапазонах эксплуатации, а также обеспечить больший объем выполняемых задач в агропромышленном комплексе с высокой эффективностью [5].

Список использованных источников

1. Просвирина Н.В. Анализ и перспективы развития беспилотных летательных аппаратов / Н.В. Просвирина // Московский экономический журнал. – 2021. – № 10. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-i-perspektivy-razvitiya-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov> (дата обращения: 26.04.2026).

2. Банкрутенко, А.В. Опыт использования беспилотных летательных аппаратов в хозяйствах подтаежной зоны западной Сибири / А.В. Банкрутенко, Н.С. Елисеева // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2023. – Т. 28, № 3. – С. 68-76. – DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-3-68-76. – EDN CCIFWU. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54409819>

3. Использование беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве / Ю.Н. Зубарев, Д.С. Фомин, А.Н. Чащин, М.В. Заболотнова // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2019. – № 2. – С. 47-51. – DOI 10.7242/2658-705X/2019.2.5. – EDN TITLEP. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38514608>

4. Анализ использования беспилотных технических средств и способы повышения их эффективности в агропромышленном комплексе / Д.О. Лебедев, С.С. Ус, Д.Д. Сеницын, Е.Е. Кузнецов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2025. – № 213. – С. 340-355. – DOI 10.21515/1990-4665-213-034. – EDN RCRYVC. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=86823351>

5. Кузнецов Е.Е. Повышение эффективности использования мобильных транспортных энергетических средств в условиях низкотемпературной эксплуата-

ции: монография / Е.Е. Кузнецов, С.В. Щитов, З.Ф. Кривуца, А.В. Кучер. – Дальневос. гос. аграр. ун-т. – Благовещенск: Дальневосточный ГАУ, 2022. – 175 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50188286>

A WAY TO IMPROVE THE OPERATIONAL PARAMETERS OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

D.O. Lebedev, S.S. Us, E.E. Kuznetsov

*Far Eastern State Agrarian University,
Blagoveshchensk, Russia*

This article considers the possibility of using a battery heating system for unmanned aerial vehicles as a way to increase the efficiency of their use in the agro-industrial complex and expand the operational parameters of the device, and also presents a technical solution to the problem.

Keywords: *unmanned aerial vehicle, temperature adaptation, design, efficiency.*

УДК 658.5.011

ВНЕДРЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ: ОСНОВНЫЕ РИСКИ

М.В. Логунова, М. К. Измайлов

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия*

В статье рассмотрены и классифицированы ключевые риски, которые могут возникнуть в процессе внедрения системы цифрового двойника (ЦД) в производственные процессы предприятия. Проведен анализ каждой категории рисков. Рассмотрены существующие разработчики цифровых систем, на основе чего выявлены основные угрозы. Продемонстрировано, каким образом каждый вид рисков оказывает влияние на операционную эффективность, экономическую эффективность и стратегическую гибкость.

Ключевые слова: *цифровой двойник, управление рисками, цифровизация, производство, промышленность.*

В современном мире промышленность вступает в новую эпоху, которую называют четвертой промышленной революцией (также известной как Индустрия 4.0 [5]) – концепцией, предполагающей новый подход к производству, основанный на массовом внедрении информационных технологий в промышленность, масштабной автоматизации бизнес-процессов и распространении искусственного интеллекта (ИИ). В основе этой революции лежит цифровизация – использование компьютеров и технологий для управления производством. Одним из основных пунктов в этой сфере является внедрение цифровых двойников (ЦД) – виртуальных копий реальных объектов, систем или процессов, которые позволяют синхронизировать работу в реальном времени.

ЦД открывают перед предприятиями множество новых возможностей: более комплексный контроль производства, моделирование процессов, оптимизация работы, а также прогнозирование и предупреждение рисков различного характера.

Однако, несмотря на все преимущества, внедрение цифровых двойников может быть достаточно сложным и даже проблематичным. Эти системы требуют большого количества данных, изменения многих процессов, больших вложений и наличия квалифицированных специалистов. Таким образом, могут возникнуть разнообразные проблемы и сбои в работе.

В связи с этим важно тщательно изучить все возможные риски и разработать способы управления ими. Это поможет избежать проблем и получить максимальную пользу от использования цифровых двойников на предприятии.

Ключевые риски.

Пользователи Цифровых двойников (ЦД) сталкиваются с рядом серьёзных угроз и рисков, связанных с их использованием. Ключевыми из них можно выделить технологические, финансовые и кадровые. Рассмотрим в отдельности каждую категорию уязвимостей.

Технологические риски.

В первую очередь технологические риски связаны с угрозами безопасности на различных этапах функционирования системы. Прежде всего, это угрозы, связанные с уязвимостями программного обеспечения (ПО). В коде некоторых компонентов ПО возможно возникновение ошибок, которые могут быть использованы для взлома. Злоумышленники смогут вмешаться в работу устройства и изменить его поведение, а также использовать уязвимости в оборудовании и программном обеспечении промышленных систем для установки вредоносного ПО [4], что способно привести к утечке важной информации, сбоям в работе оборудования или даже изменению его настроек.

Также ошибки в ПО могут привести к нарушению целостности данных, которыми обмениваются физический объект и его цифровая модель. Например, могут возникнуть некорректные конфигурации задач мониторинга или десинхронизация цифрового пространства относительно физического.

Недостаточный контроль доступа к виртуальным ресурсам создает угрозу утечки конфиденциальных данных. В системах, требующих высокой точности обработки информации, это особенно опасно: инсайдеры или злоумышленники, получившие легитимный доступ, могут использовать свои привилегии для извлечения критически важных данных.

Эти угрозы могут привести к серьёзным последствиям, включая нарушение работы критически важных систем, утечку интеллектуальной собственности и конфиденциальных данных, а также нанесение непоправимого ущерба инфраструктуре.

К технологическим рискам иного характера относятся риски некорректного моделирования.

Модель цифрового двойника представляет собой виртуальную копию физической системы или процесса, которая используется для анализа, оптимизации и прогнозирования поведения оригинала. Однако, несмотря на значительные преимущества, такие как возможность моделирования сложных сценариев и снижение затрат на эксперименты, цифровые двойники не могут охватить все потенциальные сценарии функционирования системы [1]. Это связано с несколькими ключевыми факторами:

Ограничения в сборе данных. Для создания точного цифрового двойника необходимы обширные и качественные данные о физической системе. В некоторых случаях эти данные могут быть недоступны или их сбор сопряжён с высокими затратами. Недостаток данных может привести к тому, что модель не сможет адекватно отражать все возможные сценарии поведения системы.

Сложность и нелинейность системы. Многие реальные системы обладают сложной и нелинейной природой, что делает их поведение трудно-предсказуемым. Модели цифровых двойников могут не учитывать все эти сложные взаимодействия, что приводит к неточным прогнозам в определённых условиях.

Неопределённость в данных и моделях. Данные, используемые для создания цифровых двойников, могут содержать ошибки, пропуски и искажения. Модели, основанные на этих данных, также могут иметь собственные ограничения и неточности. Высокая степень неопределённости может существенно влиять на точность прогнозов и принимаемых решений.

Динамичность системы. Физические системы часто подвержены изменениям и внешним воздействиям, которые трудно предсказать и учесть в модели. Например, изменения в окружающей среде, износ компонентов или новые технологии могут значительно повлиять на поведение системы, но эти факторы могут быть не полностью учтены в цифровом двойнике.

Также, несмотря на все технологические достижения, модели цифровых двойников разрабатываются и поддерживаются людьми. Человеческий фактор может вносить субъективность и ошибки в процесс создания и использования моделей, что также ограничивает их точность и полноту.

Таким образом, высокая степень неопределённости, присущая этим моделям, а также ограничения в сборе данных, вычислительных ресурсах и других аспектах могут приводить к некорректным прогнозам и ограничениям в применении. Поэтому важно учитывать эти факторы при разработке и использовании цифровых двойников, а также комбинировать их с другими методами анализа и моделирования для достижения более точных и надёжных результатов.

Финансовые риски.

При анализе финансовых уязвимостей важно рассмотреть следующие аспекты:

Высокие начальные инвестиции. Значительные вложения в покупку оборудования и лицензий на программное обеспечение, установку совре-

менных сенсорных систем, создание мощной вычислительной инфраструктуры, а также инвестиции в облачные сервисы и системы управления данными. Важно понимать, что даже большая сумма первоначальных затрат не всегда является риском, так как ключевым фактором является их способность окупиться.

Рассмотрим вопрос окупаемости, которая определяется соотношением прироста доходов и расходов от реализуемого проекта. Для этого необходимо обратиться непосредственно к рискам, связанным с выручкой и затратами.

Риски недополучения доходов.

В теории, чтобы повысить эффективность, внедрение ЦД должно будет увеличить прибыль. Однако на практике этого может не произойти по нескольким причинам:

Риск «Цифрового разрыва».

Цифровой двойник призван помочь оптимизировать производство, но если готовую продукцию будет невозможно реализовать из-за отсутствия спроса или логистических проблем, то прирост прибыли будет равен нулю.

Пример: ЦД спроектировал идеальный режим работы завода, увеличив объем выпуска на n -ное количество %, однако из-за падения цен на рынке или разрыва цепочек поставок этот дополнительный объем пришлось складировать или продавать ниже себестоимости. Доходы не выросли.

Риск неверной модели монетизации.

Эффект от ЦД может быть «неосвязаемым» (улучшение прогнозирования, снижение аварийности). Если в бизнес-плане изначально заложили прямой рост выручки, а получили только снижение рисков, возникает иллюзия недополученной прибыли.

Риск задержки вывода на рынок.

В процессе внедрения ЦД сегмент рынка может закрыться. Доходы, заложенные в модель окупаемости на первый год, могут быть получены только на второй, что сместит точку безубыточности (с учётом стоимости денег во времени).

Риски превышения расходов.

Создание и функционирование цифрового двойника предполагает постоянное поступление данных в режиме реального времени. Хранение, обработка и передача данных, особенно при использовании облачных технологий, сопряжены с определенными финансовыми затратами, что может неконтролируемо увеличить расходы.

Суть риска «недостоверности» заключается в необходимости обеспечения соответствия двойника реальному объекту, что требует постоянного процесса калибровки. Если отклонение между моделью и реальным объектом превышает определённый уровень, возникает утрата доверия к модели. Таким образом, риск проявляется в возникновении непредвиденных затрат, связанных с повторным сбором данных и доработкой математических моделей. Эти затраты классифицируются как накладные расходы, а значит, не будут предусмотрены в первоначальной смете.

Следует подчеркнуть, что реализация ЦД требует сотрудничества с интеграционными платформами, такими как ERP, MES и другие корпоративные системы. Это влечет за собой расходы на приобретение лицензий и непосредственно на процесс внедрения, которые могут оказаться выше ожидаемых, что приводит к увеличению капитальных затрат.

Помимо вышеупомянутых, существует также риск устаревания, который подразумевает скрытые расходы будущих периодов. Технологии развиваются быстро: через 2-3 года может выйти новое ПО или стандарты, которые сделают текущий ЦД несовместимым с новым оборудованием. Соответственно, чтобы сохранить работоспособность, потребуются новые инвестиции, не учтенные в первоначальном расчете окупаемости.

При анализе финансовых аспектов внедрения цифрового двойника в производственные процессы необходимо также оценить его целесообразность. Хотя ЦД эффективен для крупносерийного и массового производства, в условиях мелкосерийного или единичного производства затраты на настройку и перепрограммирование цифровых моделей могут значительно превысить расходы на непосредственное изготовление продукции. Следовательно, важно учитывать, что применение ЦД оправдано не во всех случаях, и его нерациональное использование может привести к убыткам вместо ожидаемой выгоды.

Кадровые риски.

Риск нехватки квалифицированных специалистов – один из самых серьезных при внедрении цифровых двойников. Проблема не только в их недостатке, но и в целом в системе и структуре кадрового резерва: рынок труда и система образования не успевают адаптироваться к развитию технологий.

В первую очередь, до сих пор немногие могут определенно сказать, какими именно навыками и компетенциями должен обладать сотрудник, работающий с ЦД. Цифровой двойник – это технология, объединяющая реальный мир и виртуальный. Соответственно, для взаимодействия с ним требуются люди, которые понимают, как осуществляются физические процессы и производство, но при этом умеют работать с большими объемами данных, создавать программы для искусственного интеллекта, а также разбираться в сложных системах управления и технологиях интернета вещей, то есть подкованы как со стороны специальных умений, так и компьютерных навыков. Очевидно, что таких людей, одинаково хорошо разбирающихся в этих достаточно полярных областях, очень мало, если вообще есть.

В связи с этим требуется разработка образовательных программ, направленных на формирование нужных компетенций, а также на набор и обучение будущих специалистов, что требует значительных как финансовых затрат, так и временных.

Следующая проблема носит скорее психологический, чем профессиональный характер: для эффективной работы с комплексными системами компаниям требуются квалифицированные и опытные специалисты, спо-

способные управлять сложными проектами, а не только осваивать новые навыки. Поэтому молодые сотрудники, которые ещё не обладают достаточным опытом, не соответствуют этим требованиям. В то же время старшему поколению может быть трудно адаптироваться к сложным новым технологиям.

Также для успешной работы с цифровым двойником предприятия необходимо глубокое понимание уникальных бизнес-процессов, характерных для данной компании. Профессионалу, занимающемуся созданием и поддержкой цифрового двойника, требуется значительное время для детального изучения всех аспектов функционирования завода или другой организации. Это включает в себя анализ производственных линий, логистических цепочек, управления запасами, а также внутренних регламентов и процедур. Кроме того, специалисту необходимо хорошо разбираться в специфике используемых технологий и программного обеспечения, а также в корпоративной культуре и приоритетах компании. Все эти факторы требуют от него высокой степени вовлеченности в работу предприятия и постоянного взаимодействия с различными его подразделениями.

Такая узкая специализация ограничивает его мобильность. Если такой профессионал решит уйти, новым сотрудникам будет сложно заменить его знания и опыт. Создание цифрового двойника требует технических навыков, а также понимания внутренних процессов и контекста, уникальных для каждой организации.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что кадровые риски являются основным препятствием для внедрения и расширения использования цифровых двойников. Эта проблема носит системный характер: рынок труда и образование не успевают за технологическим прогрессом, а стандарты компетенций для специалистов, объединяющих знания в физических и цифровых технологиях, отсутствуют. Для снижения этих рисков необходимо разработать комплексную стратегию, включающую пересмотр образовательных программ, создание систем обучения и наставничества, а также механизмы передачи знаний внутри компании. Без этих мер технологический потенциал цифровых двойников не будет реализован полностью.

Разработчики систем цифровых двойников.

Для анализа предлагается рассмотреть несколько компаний, занимающихся разработкой систем цифровых двойников (табл. 1, табл. 2). Эти фирмы были выбраны на основе принципа репрезентативности и охватывают основные промышленные отрасли и этапы жизненного цикла продукта, что позволяет обозначить ключевые сегменты рынка.

В процессе отбора разработчиков были выявлены три основных риска, которые могут повлиять на пользователей как зарубежных, так и отечественных систем:

Интеграционная сложность. Интеграция «тяжелых» инженерных систем, таких как системы автоматизированного проектирования (САПР) и управления жизненным циклом изделий (PLM), с «легкими» IoT-

платформами часто вызывает проблемы. Эти сложности включают потерю данных и необходимость внесения изменений, что может значительно замедлить внедрение и увеличить расходы на поддержку системы.

Качество исходных данных. Миграция данных из устаревших систем, например, при переходе с SAP или старых систем PLM на современные платформы, требует значительных ресурсов на очистку и верификацию данных [7]. Пренебрежение этими этапами может привести к тому, что цифровой двойник будет создан на основе некорректных данных, что, в свою очередь, вызовет моделирование ошибок, а не реальных процессов.

Безопасность и компетенции. Для российских компаний, работающих с АО «МЦД» [3] и CompMechLab [6], критически важно соблюдать требования регуляторов, таких как ФСТЭК и Минобороны [4], при использовании виртуальных копий критически важных объектов. Это требует как технических мер безопасности, так и наличия специалистов узкого профиля, способных эффективно управлять и поддерживать эти системы.

Таблица 1 – Отечественные разработчики систем цифровых двойников

Название	Краткое описание	Опыт	Продукты
АО «Моделирование и цифровые двойники» (АО «МЦД»)	Разрабатывает инженерные цифровые продукты и решения для проектных, научно-исследовательских и производственных предприятий	Клиентами АО «МЦД» на территории России и стран СНГ являются более 900 организаций в академической среде и различных отраслях промышленности. Среди них – ведущие организации РОСКОСМОСА, РОСАТОМА, ОАК, ОСК, ОБОРОНПРОМА, ТЭК и др. отраслей	SmartGranum.
			ServiceVizor.
			УМКАМатериалы.
			CAE Fidesys.
			Логос.
			DT Seven.
			CADFlo.
			SimInTech (Simulation In Technic)
			САПР Гамма
			Цифровой двойник
ООО «Лаборатория „Вычислительная механика“» (CompMechLab)	Разрабатывает цифровые двойники изделий, систем, технологических и производственных процессов в высокотехнологичных отраслях промышленности.	Официальный дистрибьютор инженерного ПО в России и дружественных странах. Поставляет лицензии предприятиям, НИИ и вузам, проводит обучение. Лауреат Национальной премии «Индустрия» (2017), национальный чемпион (2018). Разрабатывает Цифровую платформу CML-Bench® для создания и использования цифровых двойников	CML-Bench®
			CAE Fidesys
			FlowVision
			PeВерсия®
			Универсальный механизм
			APM
			ELCUT
			EULER
			ZWSOFT
			TM Horizon
			QForm

«Серп»	Создаёт цифровые двойники производств, в том числе с использованием виртуальной (для тренажёров) и дополненной реальности (VR/AR). Создаёт цифровые двойники производств, в том числе с использованием виртуальной (для тренажёров) и дополненной реальности (VR/AR).	Машиностроение: внедрение роботизированных ячеек с системой управления «S-MES: Орбита» и цифровизация предприятий. Электроэнергетика: автоматизация предприятий и технологических процессов. Медицина: экосистема здравоохранения с Human Robots, ИИ и алгоритмами нейронных сетей. Нефтегазовая отрасль: автоматизация предприятий и технологических процессов. Электронная промышленность: автоматизация предприятий и процессов. Образование: роботизированные мини-лаборатории для школ и университетов. Машиностроение: внедрение роботизированных ячеек с системой управления «S-MES: Орбита» и цифровизация предприятий. Электроэнергетика: автоматизация предприятий и технологических процессов. Медицина: экосистема здравоохранения с Human Robots, ИИ и алгоритмами нейронных сетей. Нефтегазовая отрасль: автоматизация предприятий и технологических процессов. Электронная промышленность: автоматизация предприятий и процессов. Образование: роботизированные мини-лаборатории для школ и университетов.	Система управления производством «S-MES: Орбита»
			Роботизированные ячейки для образования
			Решения для автоматизации предприятий и отдельных производственных участков
			Экосистема в области здравоохранения
			Программное обеспечение для внедрения и сопровождения на платформах 1С и «Галактика».
			Совместное решение с оператором Т2 для промышленного интернета вещей (IIoT). 6
			Кроме того, компания занимается созданием цифровых двойников, прогнозированием работы инженерного оборудования и оснащением предприятий специализированным оборудованием для построения киберфизических систем.
			Система управления производством «S-MES: Орбита»
			Роботизированные ячейки для образования

Таблица 2 – Зарубежные разработчики систем цифровых двойников

Название	Краткое описание	Опыт	Продукты
IBM.	Предлагает решения Digital Twin и Digital Thread, основанные на искусственном интеллекте и технологиях IoT. Нацелены на такие отрасли, как аэрокосмическая промышленность, производство и автомобилестроение.	IBM создала цифровых двойников для оптимизации сетей и внедрения «зеленой» энергетики. * Проект «Газовая система будущего» (SGN, Великобритания) * Партнерство с Dassault Systèmes IBM Maximo применяется для управления сложными объектами. Примеры: * Управление аэропортом (Jacobs) * Мониторинг мостов (Южная Каролина, США) IBM внедряет цифровые двойники с использованием 5G. * 5G-фабрика (IBM и Samsung, Сингапур) * Тестирование в «песочнице» IBM Research разрабатывает цифровые двойники нового поколения на основе ИИ. * Разработка аккумуляторов для электромобилей (IBM и Sphere Energy)	Платформа управления активами – IBM Maximo
			Интеграционная платформа – IBM Digital Twin Exchange
			Инструменты IoT и ИИ – IBM Watson IoT Platform, IBM Watson (AI и ML)
			Инструменты разработки и интеграции – IBM Engineering Lifecycle Management, Партнерские решения (Aras, Dassault Systèmes)
PTC Inc. (Parametric Technology Corporation)	Специализируется на платформах Industrial IoT и Digital Twin. Предлагает решения для управления жизненным циклом продуктов, а также интеллектуальное производство и цифровое распределение услуг.	Клиентами PTC являются ведущие мировые производители в различных отраслях. Компания имеет богатый опыт реализации проектов, включая сотрудничество с Vestas (инновации в разработке ветряных турбин), Volvo Group (улучшение качества продукции с помощью цифровых нитей), Polaris (повышение инновационности продуктов), Cummins (оптимизация дизайна для устойчивого развития). Также реализованы проекты для фармацевтической компании Polpharma (мониторинг активов и удаленное обслуживание) и энергетического гиганта ENGIE (цифровой двойник промышленной печи). Стратегическое партнерство с Rockwell Automation охватывает сотни новых клиентов в сфере промышленного Интернета вещей.	ThingWorx® (платформа для разработки приложений IIoT и цифровых двойников, обеспечивает сбор данных и связь с физическими объектами)
			Creo (САПР, интегрированная с IoT и AR для создания цифровых двойников на этапе проектирования, модуль Creo Product Insight позволяет передавать эксплуатационные данные обратно в CAD-модель)
			Windchill (система управления жизненным циклом продукта (PLM), обеспечивает управление данными об изделии)
			Vuforia® (платформа для дополненной ре

			альности (AR), используется для визуализации данных цифрового двойника и удаленной поддержки, например Vuforia Chalk) . Codebeamer (система управления требованиями и жизненным циклом приложений (ALM)) . ServiceMax (решение для управления сервисным обслуживанием на местах) CML-Bench® – цифровая платформа ООО «Лаборатория „Вычислительная механика“»
Dassault Systèmes	Предлагает решения Digital Twin на своей платформе 3DEXPERIENCE, которая позволяет управлять жизненным циклом продуктов от начала до конца, а также использовать возможности моделирования.	Компания сотрудничает с более чем 370 000 клиентов по всему миру, включая: • Airbus: стратегическое партнерство с использованием платформы 3DEXPERIENCE для разработки гражданских и военных самолетов. Более 20 000 пользователей сокращают циклы разработки и улучшают поддержку. Dassault Systèmes предоставляет решения «Program Excellence», «Winning Concept» и «Keep Them Operating». • L'Occitane en Provence: применяет технологию «виртуальный двойник как услуга» (VTaaS) для оптимизации операций и создания безопасной производственной среды. • Boeing 777: проект 1989 года по созданию цифрового двойника первого авиалайнера.	3DEXPERIENCE: платформа для совместной работы, создающая виртуальные двойники. CATIA: 3D-моделирование и проектирование сложных продуктов. DELMIA: цифровой двойник производства, оптимизация процессов. SIMULIA: мультидисциплинарное имитационное моделирование. ENOVIA: управление жизненным циклом продукта и данными. BIOVIA: моделирование в медико-биологических науках. 3DVIA: иммерсивная визуализация. VTaaS: облачный сервис для моделирования и оптимизации.

Из таблиц видно, что цифровой двойник представляет собой сложную систему. Ее разработкой занимаются как крупные международные компании, предоставляющие готовые компоненты своей экосистемы, так и отечественные интеграторы. Последние создают предложения на базе собственных технологий и партнерских продуктов для конкретных отраслей. Российские специалисты уже научились создавать отдельные элементы (например, CAD/CAE) и активно работают над созданием платформ для интеграции, чтобы заменить западные решения, постепенно уходящие с рынка.

Влияние.

Реализация описанных выше рисков при внедрении цифровых двойников (ЦД) может оказать существенное негативное воздействие как на отдельные производственные операции, так и на деятельность всего предприятия. Влияние проявляется по трем основным направлениям: операционная эффективность (ОЭ) – оценивается ухудшение текущих производственных показателей; экономическая эффективность (ЭЭ) – оценивается способность предприятия окупать вложения, соблюдать бюджет и генерировать денежный поток; стратегическая гибкость (СГ) – оценивается способность предприятия адаптироваться к изменениям рынка, технологий и внешней среды в долгосрочной перспективе.

Далее рассмотрены эффекты для данных критериев, вызываемые указанными в статье группами рисков.

Влияние на операционную эффективность. Технологические риски проявляются в управлении на основе устаревших данных, что ведёт к браку и перерасходу сырья, а также к остановкам процесса из-за ложных команд. В итоге снижается общая эффективность оборудования, растёт аварийность, возникает необходимость возврата к ручному управлению. Финансовые риски выражаются в смещении расходов с основного производства на разработку и поддержку системы ЦД, что увеличивает операционные затраты, затягивает внедрение и снижает окупаемость инвестиций. Кадровые риски связаны с уходом специалиста, работающего с двойником: на время поиска замены, которое может быть длительным из-за нехватки квалифицированных кадров, возникает простой ЦД. Это формирует недоверие к системе, рост брака и простоев из-за человеческого фактора.

Влияние на экономическую эффективность. Технологические риски порождают внеплановые затраты на повторный сбор данных и доработку моделей, а также упущенную выгоду из-за простоев и брака. В результате капитальные затраты превышают смету, снижается рентабельность. Финансовые риски создают иллюзию недополученной прибыли и через некоторое время приводят к вынужденным повторным инвестициям из-за несовместимости. Это смещает или устраняет точку безубыточности, формируя «финансовую яму» вместо окупаемости. Кадровые риски увеличивают расходы на наём, обучение и удержание редких специалистов с двойными компетенциями, а также ведут к потере вложенных в обучение средств при

уходе сотрудника. Следствием становятся рост операционных расходов и низкая отдача от инвестиций в человеческий капитал.

Влияние на стратегическую гибкость. Технологические риски обусловлены тем, что ЦД работает на определённом программном обеспечении. Смена вендора требует полной перестройки, а отказ западных поставщиков грозит потерей поддержки и обновлений. Это усиливает технологическую зависимость и снижает способность быстро менять ИТ-среду. Финансовые риски проявляются в том, что затраты на перепрограммирование ЦД при смене номенклатуры превышают выгоду, а новые инвестиции требуются регулярно, тогда как бюджет быстро исчерпывается. В итоге предприятие «застревает» на устаревшей версии ЦД, в то время как конкуренты уходят вперёд. Кадровые риски: уход специалиста превращает ЦД в «пустышку», поскольку никто не понимает его внутреннего устройства. Рынок труда не может быстро предоставить замену, что ведёт к длительному простоя. Возникает критическая зависимость от конкретных людей и невозможность масштабировать цифровизацию на новые площадки.

По этим данным можно сделать следующий вывод: внедрение цифрового двойника способно одновременно снизить операционную и экономическую эффективность, а также лишить предприятие стратегической гибкости. В связи с этим критически важно сделать системное управление рисками не второстепенной задачей, а одним из центральных элементов проектов по цифровизации, закладываемых ещё на стадии разработки систем цифровых двойников и сопровождающих их на этапах внедрения и эксплуатации в течение всего жизненного цикла.

Проведённый в данной работе анализ позволяет утверждать, что внедрение систем цифровых двойников в производственные процессы промышленных предприятий, несмотря на высокий потенциал повышения эффективности, вместе с тем может стать источником возникновения рисков различного характера, которые способны не только нивелировать все преимущества своего использования, но и нанести серьёзный ущерб показателям компании.

В ходе работы над настоящим исследованием ключевые риски были классифицированы по трём категориям: технологические, финансовые и кадровые. Было выявлено, что технологические уязвимости создают прямые угрозы для бесперебойной работы производства, а также могут стать причиной утечки конфиденциальных данных. Финансовые риски делают проекты по цифровизации производственных процессов экономически уязвимыми, так как связаны с высокими начальными инвестициями и неопределённостью окупаемости. К тому же имеют место скрытые затраты и моральное устаревание тех или иных решений. Основными кадровыми рисками являются отсутствие на рынке специалистов, обладающих необходимым комплексом компетенций, а также высокая ценность, уникальность и незаменимость каждого нанятого на должность, связанную с взаимодействием с ЦД, кадра.

Указанные риски оказывают влияние по трём основным направлениям: операционной и экономической эффективности, а также стратегической гибкости. К основным эффектам можно отнести снижение первых двух и потерю третьей.

Таким образом, управление рисками при внедрении цифровых двойников должно быть одной из ведущих задач на самых начальных стадиях работы и оставаться таковыми на протяжении всего времени их использования. Только при таком подходе предприятие сможет минимизировать угрозы и реализовать преимущества цифровых двойников как инструмента Индустрии 4.0 [2, 5], избежав превращения инновации в источник убытков и организационной нестабильности.

Список использованных источников

1. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. – М.: Стандартиформ, 2022.
2. Как цифровые двойники помогают российской промышленности // Rusbase [Электронный ресурс]. – URL: <https://rb.ru/longread/digital-twin/>
3. Моделирование и цифровые двойники : официальный сайт / АО «МЦД». – Москва, 2022–2025. [Электронный ресурс]. – URL: <https://digitaltwin.ru/> (дата обращения: 21.04.2026).
4. Мясникова О.В. Риски цифровой трансформации и управление ими на базе интеллектуального цифрового двойника производственно-логистической системы // Бизнес. Инновации. Экономика. – Минск: Институт бизнеса БГУ, 2024. – С. 140-154
5. Цифровые двойники: что это, примеры, применение // РБК Тренды [Электронный ресурс]. – URL: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/6107e5339a79478125166eeb>
6. CompMechLab: программное обеспечение для инженерного анализа и цифровых двойников : официальный сайт / ООО «Компьютерная инженерия». – Санкт-Петербург. [Электронный ресурс]. – URL: <https://cml-software.ru/> (дата обращения: 21.04.2026).
7. SAP ERP: управление предприятием : официальный сайт / SAP SE. [Электронный ресурс]. – URL: <https://s-erp.ru/> (дата обращения: 21.04.2026).

IMPLEMENTATION OF DIGITAL DOUBLE IN PRODUCTION PROCESSES: MAIN RISKS

M.V. Logunova, M. K. Izmaylov

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia*

The article considers and classifies key risks that may arise in the process of implementing a digital twin system (DT) in production processes of an enterprise, The analysis of each category of risks is carried out. Existing developers of digital systems are considered, on the basis of which the main threats are identified. It demonstrates how each type of risk affects operational efficiency, economic efficiency, and strategic flexibility.

Keywords: digital twin, risk management, digitalization, manufacturing, industry.

КРЕПЕЖНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ В СОВРЕМЕННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

А.Н. Лошаев

*Сибирский государственный университет путей сообщения,
г. Новосибирск, Россия*

В статье описаны некоторые крепёжные детали и соединения (болтовое, винтовое и шпильное), так как именно они обеспечивают сборку, ремонтпригодность и надёжность большинства машин и механизмов. В отличие от неразъёмных соединений (сварка, пайка, клёпка), крепёжные (разъёмные) позволяют многократно собирать и разбирать узлы без разрушения деталей. В статье приведен пример индивидуального задания.

Ключевые слова: инженерная графика, трехмерная модель, болт, винт, шпилька, крепежные детали

В машиностроении, в различных механизмах очень часто встречаются разъёмные соединения, которые обеспечивают необходимую разборку для ремонта и обслуживания, а также выдерживают большие нагрузки. Однако выбор между болтовым, винтовым или шпильным соединением, как мы узнали на учебных занятиях по дисциплине «Начертательная геометрия и инженерная графика», – это не случайность, а инженерный расчет, влияющий на технологичность, надежность и стоимость всей конструкции. Я обучаюсь на первом курсе на факультете «Управление транспортно-технологическими комплексами» по специализации «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные средства и оборудование».

Для меня, как для будущего инженера-механика, важно знать, когда и почему применяется каждый из трех вышеперечисленных типов крепежа. На практических занятиях по инженерной графике я узнал много нового об этих типах крепежных соединений.

Болтовое соединение – это самый распространенный и узнаваемый способ фиксации деталей. В нем, кроме соединяемых деталей, участвуют три элемента: болт, гайка и шайба, используемая для распределения нагрузки или стопорения. Соединяемые детали имеют сквозные отверстия, в которые вставляется болт, а с противоположной стороны на его резьбовой конец накручивается гайка. Отверстия по болт рассчитываются, их диаметр равен $1,1 \times$ на диаметр болта. Длина болта тоже рассчитывается. Основным преимуществом болтовых соединений является простота монтажа, высокая надежность, возможность работы на сдвиг (за счет установки болта без зазора) и легкая замена крепежа. Болтовые соединения применяются в узлах, где необходим доступ с обеих сторон конструкции, например: фланцевые соединения трубопроводов; крепление двигателя на раме; рельсовые стыки; сборные металлоконструкции.

Винтовое соединение. В него входят соединяемые детали, винт и шайба. Винт – это деталь, которая вкручивается непосредственно в одну из соединяемых деталей. Одна соединяемая деталь имеет сквозное отверстие

(под гладкую часть винта), а вторая – глухое резьбовое отверстие. Диаметр отверстия под гладкую часть винта рассчитывается, он равен $1,1 \times$ на диаметр винта. Винт свободно проходит через первую деталь и врезается резьбой во вторую, стягивая их. Длина винта тоже рассчитывается. Основным преимуществом винтовых соединений является компактность (нет выступающей гайки), меньшая металлоемкость, часто не требуется доступа с обратной стороны (глухие отверстия), быстрый монтаж. Винтовые соединения используются в корпусных деталях. С их помощью прикрепляются крышки, фланцы, кронштейны; практически все корпуса двигателей, насосов, станков и пр.

Шпилечное соединение. В него входят соединяемые детали, шпилька, гайка и шайба. Шпилька – это цилиндрический стержень с резьбой на обоих концах и гладкой серединой. Посадочный конец шпильки (обычно короче) вкручивается в резьбовое отверстие корпуса (как винт). На стяжной конец шпильки надевается вторая деталь (с гладким отверстием). Ее диаметр под шпильку тоже рассчитывается, он равен $1,1 \times$ на диаметр шпильки. Сверху накручивается гайка, которая и прижимает деталь к корпусу. Глухое резьбовое отверстие в корпусе называется гнездом под шпильку. Длина шпильки тоже рассчитывается. Основным преимуществом шпилечных соединений является высокая долговечность резьбы в корпусной детали (изнашивается только гайка), равномерная затяжка, удобство при частом монтаже/демонтаже, способность работать при больших осевых нагрузках. Шпилечное соединение широко используется в машиностроении, например: крепление крышек подшипниковых узлов; блоков цилиндров; фланцев корпусов высокого давления и пр.

Одним из индивидуальных заданий по инженерной графике было соединение с помощью крепежных деталей – болта, винта, шпильки и штифта. По заданному чертежу было необходимо прочитать форму и конструкцию соединяемых деталей. Определить где какое стандартное изделие будет установлено. Для всех стандартных изделий, входящих в данную сборку – болтов, винтов, шпилек, гаек и шайб, – были заданы диаметры и ГОСТы.

Содержание чертежа определяется индивидуальным заданием и включает в себя выполнение упрощенного изображения резьбовых соединений – болтового, шпилечного, винтового и штифтового. Изображение соединяемых деталей перечерчивается по исходным данным индивидуального варианта. Длины болтов и шпилек подбираются в зависимости от толщины соединяемых деталей. Длины ввинчиваемых концов винтов и шпилек выбираются в зависимости от области применения последних. Крепежные детали вычерчиваются в масштабе по относительным размерам, установленным зависимостями размеров элементов деталей крепления от диаметра резьбы. На сборочном чертеже проставить габаритные, установочные и присоединительные размеры и расставить позиции. На отдельном листе формата А4 выполнить спецификацию.

Данное задание мы выполняли, используя электронные ресурсы и учебное пособие преподавателей кафедры «Графика» СГУПС [1, 2]. По заданному чертежу конструкции (рис. 1), было необходимо рассчитать дли-

ны болтов, винтов и шпилек, создать трехмерную сборку, оформить сборочный чертеж и спецификацию (рис. 2).

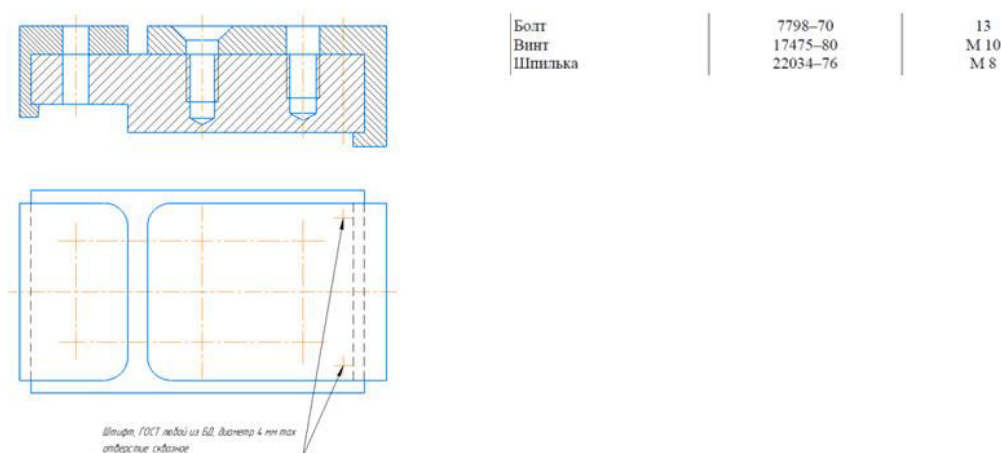


Рисунок 1 – Условие задания

Все графические задания по инженерной графике во втором семестре мы выполняем в Компас-3D. После проведенных необходимых расчетов, я выполнил трехмерные модели всех входящих в данную сборку деталей. Затем с помощью команды Совпадение собрал их в режиме Сборка, вставив крепежные детали из библиотеки стандартных изделий и используя сопряжения. Все детали, имеющие шестигранные поверхности, на главном виде развернул тремя гранями, а прорезь под отвертку у винта – под углом 45 градусов. Затем выполнил сборочный чертеж и оформил спецификацию. В целом, на выполнение данного задания я затратил около четырех часов. Почти половина затраченного времени ушла на необходимые расчеты и чтение формы скрепляемых деталей.

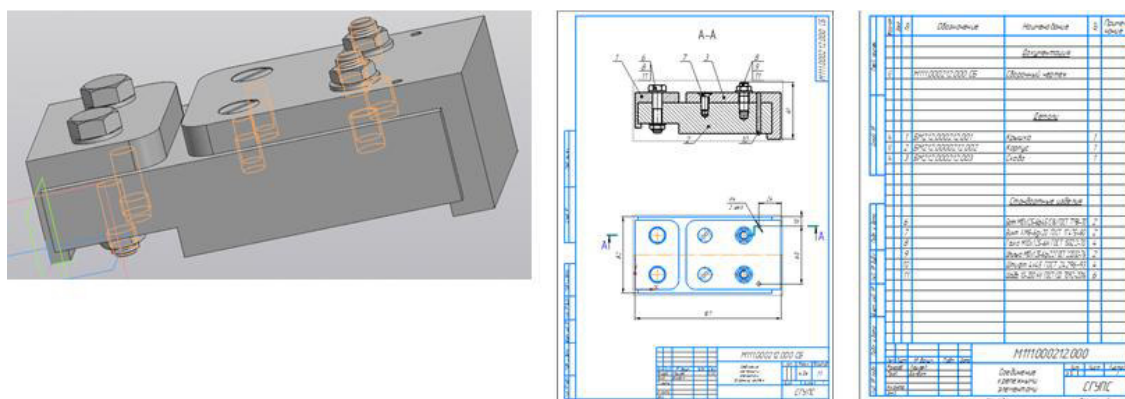


Рис.1 – Пример индивидуального задания

Выполняя данное задание, я узнал, что выбор между болтом, винтом и шпилькой является эксплуатационной задачей.

Болтовые, винтовые и шпильчные соединения являются базовыми видами разъемных резьбовых соединений в машиностроении. Выбор кон-

кретного типа определяется условиями эксплуатации, технологией сборки, требованиями к прочности и экономической целесообразностью. Болт используем, когда необходимо обеспечить простоту замены детали при двустороннем доступе. Винт выбирается для компактности и для корпусных деталей с толстыми стенками. Шпильку используем для самых ответственных узлов, где важна ремонтпригодность корпуса и точность сборки.

Изучение данного учебного материала очень важно для будущих инженеров-механиков [3].

Список использованных источников

1. Сергеева, И.А. Современные средства наглядности при обучении начертательной геометрии / И.А. Сергеева, О.Б. Болбат // Образование и проблемы развития общества. – 2024. – № 2(27). – С. 16-22. – EDN QXTYFX.

2. Вольхин, К.А. Инженерная графика: учебное пособие для вузов / К.А. Вольхин, Т.А. Астахова, О.Б. Болбат. – Новосибирск: Сибирский государственный университет путей сообщения, 2010. – 144 с. – ISBN 5-93461-449-5. – EDN TARQMF.

3. Болбат, О.Б. Роль графических дисциплин в формировании конкурентоспособного инженера транспорта / О.Б. Болбат, И.А. Сергеева, О.В. Щербакова // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Гуманитарные науки. – 2023. – № 2-2. – С. 40-45. – DOI 10.37882/2223-2982.2023.2-2.04. – EDN SSFJBU.

FASTENING JOINTS IN MODERN MACHINE BUILDING

A.N. Loshayev

*Siberian Transport University,
Novosibirsk, Russia*

The article describes some fasteners and connections (bolt, screw and stud), since they provide assembly, maintainability and reliability of most machines and mechanisms. Unlike one-piece joints (welding, soldering, riveting), fastening (detachable) allow you to repeatedly assemble and disassemble assemblies without destroying parts. The article provides an example of an individual task.

Keywords: *engineering graphics, 3D model, bolt, screw, stud, fasteners*

УДК 004.056:681.5

МОДЕЛЬ СЕГМЕНТАЦИИ И ИЗОЛЯЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СЕТИ КАК ЭЛЕМЕНТ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

А.А. Лукоянов

*Автономная некоммерческая организация
«Проектный офис по развитию туризма и гостеприимства Москвы»,
г. Москва, Россия*

В статье рассматривается задача обеспечения информационной безопасности производственного предприятия при эксплуатации станков с ЧПУ (числовым

программным управлением), инженерных рабочих станций, промышленных контроллеров и программного обеспечения с ограниченной возможностью независимой проверки. Предложена модель сегментации и изоляции технологической сети, основанная на выделении сетевых зон, промежуточной зоны обмена, контролируемого удаленного доступа и мониторинга разрешенных взаимодействий. Применение модели снижает вероятность распространения инцидента из корпоративной сети в производственный контур и ограничивает риски эксплуатации оборудования с закрытой архитектурой.

Ключевые слова: информационная безопасность, производственное предприятие, технологическая сеть, сегментация сети, изоляция сети, станки с ЧПУ, АСУ ТП, межсетевое экранирование, удаленный доступ, мониторинг.

Введение. Современное производство основано на широком применении программно-управляемого технологического оборудования. На предприятиях используются станки с числовым программным управлением, промышленные контроллеры, инженерные рабочие станции, HMI/SCADA-компоненты, серверы технологических данных и иные средства автоматизации [6]. При этом практически все такое оборудование в целях обновления, настройки, диагностики, обмена производственными заданиями и интеграции с другими системами подключается к локальной сети предприятия. Это повышает управляемость и эффективность производственного процесса, однако одновременно расширяет поверхность возможного воздействия на технологическую инфраструктуру и создает дополнительные риски информационной безопасности.

Дополнительные риски связаны с оборудованием с предустановленным программным обеспечением, возможности проверки которого ограничены [1]. Эксплуатирующая организация не всегда знает его встроенные функции, механизмы обновления и сетевые взаимодействия, а изменение конфигурации может быть ограничено требованиями поставщика или риском нарушения технологического процесса. В таких условиях практическим способом снижения риска является формирование закрытого контролируемого контура на основе разделения технологической и корпоративной инфраструктуры [6, 7]. Оборудование размещается в выделенных сегментах, а все внешние взаимодействия допускаются только через контролируемые точки. Цель статьи – предложить модель сегментации и изоляции технологической сети производственного предприятия.

Модель сегментации и изоляции. Предлагаемая модель основана на разделении инфраструктуры на зоны с различным уровнем доверия [6, 7]. Корпоративный сегмент предназначен для офисных задач и не должен иметь прямого доступа к станкам и контроллерам. Обмен производственными заданиями и документацией выполняется через промежуточную зону, а удаленный доступ администраторов и поставщиков – через контролируемый шлюз с применением СКЗИ, усиленной аутентификации и журналирования [5, 6]. Технологический сегмент объединяет оборудование, участвующее в производственном процессе.

Для оборудования с повышенным риском целесообразно выделять изолированные технологические ячейки: устаревшие системы, станки с закрытым программным обеспечением, сервисные интерфейсы и критичные узлы. Основной принцип модели – минимально необходимое взаимодействие, при котором каждое разрешенное соединение имеет технологическое обоснование, а остальные направления обмена блокируются по умолчанию [6, 7].

Таблица 1 – Сегменты технологической сети и основные меры защиты

Сегмент	Состав	Основной риск	Меры защиты
Корпоративная сеть	АРМ, почта, офисные приложения	Распространение атаки на технологическую сеть	Разделение IT/OT, МЭ, запрет прямых маршрутов
Зона обмена	Файловый шлюз, сервер заданий	Передача зараженных или измененных файлов	Проверка файлов, контроль целостности, журналирование
Удаленный доступ	Защищенный канал удаленного доступа, jump-сервер, АРМ администратора	Неконтролируемое подключение поставщика	Многофакторная аутентификация, временный доступ, запись сессий
Технологический сегмент	Станки, ПЛК, HMI/SCADA, инженерные АРМ	Нарушение технологического процесса	Белые списки соединений, запрет интернета
Изолированные области	Критичные станки, закрытое/устаревшее ПО	Неизвестные уязвимости и скрытые обращения	VLAN/VRF или физическое разделение, минимум портов
Мониторинг информационной безопасности	Журналы, NTA/SIEM, сетевые сенсоры	Несвоевременное выявление инцидента	Корреляция событий, контроль аномалий, хранение логов

Схема защищенного взаимодействия. Обобщенная структура защищенного взаимодействия представлена на рисунке 1. В модели исключается прямое соединение офисных рабочих станций со станками и контроллерами. Передача файлов и производственных заданий выполняется через промежуточную зону, а удаленное обслуживание – через выделенный шлюз с фиксацией действий. Межсетевой экран на границе IT/OT реализует матрицу разрешенных потоков: источник, назначение, протокол, порт, владелец правила и цель обмена.

Порядок внедрения и ожидаемый эффект. Внедрение модели начинается с инвентаризации станков, контроллеров, инженерных рабочих станций, серверов, сетевых устройств и программного обеспечения. Для каждого узла определяются функция, критичность, используемые протоколы и ограничения на применение средств защиты. После этого анализируются сетевые взаимодействия и выделяются только необходимые каналы связи.

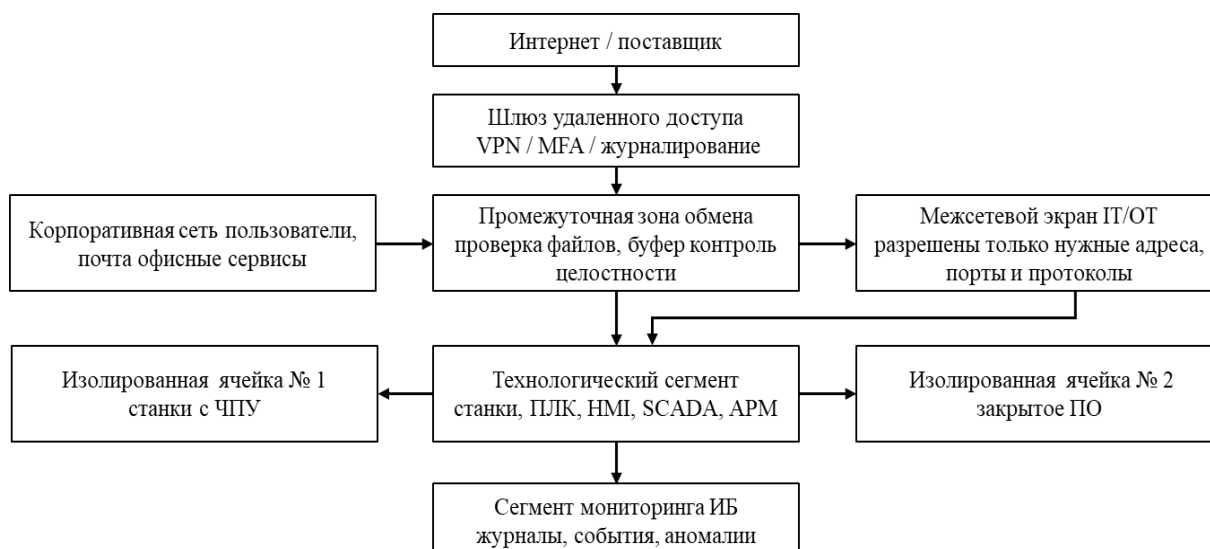


Рисунок 1 – Модель сегментации и изоляции технологической сети

На основе этих данных формируются целевые зоны, границы межсетевого экранирования, промежуточная зона обмена, шлюз удаленного доступа и точки мониторинга. Оборудование с закрытым или трудно проверяемым программным обеспечением размещается в изолированной ячейке с минимально необходимыми каналами связи.

Такая модель снижает вероятность неконтролируемого распространения инцидента: межсетевой экран и зона обмена ограничивают переход воздействия из офисного контура в технологический сегмент, а изоляция ячеек уменьшает возможную зону поражения. При этом сегментация должна дополняться управлением учетными записями, резервным копированием, контролем съемных носителей и регулярным пересмотром сетевых правил.

Заключение. Предложена модель сегментации и изоляции технологической сети как элемент обеспечения информационной безопасности производственного предприятия. Ее основными компонентами являются разделение корпоративной и технологической сети, промежуточная зона обмена, контролируемый удаленный доступ, изолированные технологические ячейки и мониторинг сетевых событий.

Применение модели позволяет снизить риски несанкционированного доступа, распространения вредоносного программного обеспечения и нарушения технологического процесса при эксплуатации оборудования с предустановленным программным обеспечением, возможности независимой проверки которого ограничены. Результаты могут быть использованы при проектировании защищенной архитектуры производственной сети и разработке внутренних регламентов эксплуатации технологической инфраструктуры.

Список использованных источников

1. Бережанский Н.В., Аряшев С.И., Васильев С.В., Арнаутов А.Г., Хасанов И.И. Вызовы при организации АСУ ТП на открытых архитектурах в контексте

информационной безопасности // Безопасность информационных технологий. – 2026. – Т. 33, № 2. – С. 1–10. – DOI: 10.26583/bit.2026.2.01. EDN: AHWPQD.

2. Грачков И.А. Информационная безопасность АСУ ТП: возможные вектора атаки и методы защиты // Безопасность информационных технологий. – 2018. – Т. 25, № 1. – С. 90–98. – DOI: 10.26583/bit.2018.1.09. EDN: YWYPWX.

3. Машкина И.В., Гарипов И.Р. Разработка ЕРС-моделей угроз нарушения информационной безопасности автоматизированной системы управления технологическими процессами // Безопасность информационных технологий. – 2019. – Т. 26, № 4. – С. 6–20. – DOI: 10.26583/bit.2019.4.01. EDN: KYEBPF.

4. Заид Алкилани М.О., Машкина И.В. Разработка сценариев атак для оценки угроз нарушения информационной безопасности в промышленной сети // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2024. – № 1(58). – С. 96–109. DOI: 10.48612/jisp/xvqx-k619-3f2z. EDN: PDNEWN.

5. Забиров И.И., Машкина И.В. Применение систем идентификации и управления доступом в автоматизированных системах управления технологическими процессами // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2022. – № 2. – DOI: 10.48612/jisp/z3tz-82ax-h4zt. EDN: IIIHOK.

6. Stouffer K., Pease M., Tang C.Y. et al. Guide to Operational Technology (OT) Security. NIST Special Publication 800-82 Rev. 3. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2023. – DOI: 10.6028/NIST.SP.800-82r3.

7. IEC 62443-3-3:2013. Industrial communication networks – Network and system security – Part 3-3: System security requirements and security levels.

8. ГОСТ Р 59547–2021. Защита информации. Мониторинг информационной безопасности. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2021.

MODEL OF SEGMENTATION AND ISOLATION OF THE TECHNOLOGICAL NETWORK AS AN ELEMENT OF INFORMATION SECURITY OF A MANUFACTURING ENTERPRISE

A.A. Lukoyanov

Autonomous Non-profit Organization

“Project Office for the Development of Tourism and Hospitality of Moscow”,

Moscow, Russia

The article considers the task of ensuring information security at a manufacturing enterprise during the operation of CNC machines, engineering workstations, industrial controllers, and software with limited possibilities for independent verification. A model of segmentation and isolation of the technological network is proposed. The model is based on the allocation of network zones, an intermediate data exchange zone, controlled remote access, and monitoring of permitted interactions. The application of the model reduces the probability of incident propagation from the corporate network to the production environment and limits the risks associated with the operation of equipment with a closed architecture.

Keywords: *information security, manufacturing enterprise, technological network, network segmentation, network isolation, CNC machines, industrial control systems, firewalling, remote access, monitoring.*

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКОМ ЦЕННОСТИ В ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

В.Л. Лучинкин

*Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия*

Предложена математическая модель интеллектуального управления потоком ценности промышленного предприятия, объединяющая описание состояния потока, оценку и прогнозирование потерь, и выбор управляющего воздействия в рамках многопериодной задачи оптимизации. В отличие от существующих подходов, где цифровые двойники и инструменты ИИ применяются разрозненно, модель формирует единый замкнутый контур управления. Подход требует проверки на данных реальных производственных систем.

Ключевые слова: цифровой двойник; value stream management; бережливое производство; оптимизация производственных потоков; узкие места; искусственный интеллект; интеллектуальное управление; дискретно-событийное моделирование; reinforcement learning.

Введение

Современное промышленное производство характеризуется высокой изменчивостью спроса, ростом номенклатуры и усложнением технологических маршрутов. В этих условиях динамичное создание ценности определяется загрузкой, простоями, качеством и внешними ограничениями.

Цифровые двойники применяются для уточнения производственных планов и сценарного анализа; методы машинного обучения – для локальной оптимизации отдельных операций. Оба направления, однако, остаются разрозненными и не образуют единого контура управления потоком ценности.

Это и порождает задачу: нужна модель, в которой цифровое представление системы, методы прогнозирования и выбор управляющих воздействий описаны в единой формальной схеме.

Краткий обзор литературы

В отечественной литературе по этой теме выделяются три исследовательских направления. Первое – цифровой двойник как инструмент оптимизации и сценарного анализа. В работе Митрофанова и Перервы цифровые двойники прямо рассматриваются как средство оптимизации процессов и повышения эффективности производства, а также как развитие традиционного подхода к управлению производственными системами в контексте Индустрии 4.0 [1]. Ткаченко предлагает цифровой двойник производственной системы машиностроительного предприятия для актуализации производственных планов, то есть фактически для перехода от статического плана к динамически пересчитываемому плану действий. Макаров, Бахтизин и Бекларян описывают разработку цифровых двойни-

ков производственных предприятий на основе имитационного моделирования, интеграции с базами данных и интеллектуальными модулями оптимизации; это важное направление, поскольку оно уже подводит цифровой двойник к формализованному вычислительному ядру [2].

Второе направление – интеллектуальные системы управления и ИИ в промышленности. Скворцова, Захаров и Булатов рассматривают применение машинного обучения, нейросетей и экспертных систем в автоматизации производства [3]. Алборова, Перевозчикова и Пальмов подчёркивают их потенциал для снижения затрат и повышения эффективности процессов. В отечественной литературе ИИ как слой принятия решений уже легитимизирован, однако строгой математической увязки с потоком ценности пока нет.

Третье направление – цифровой двойник как среда сценарного моделирования; здесь концентрируется наиболее строгая математическая часть. Lee и Yang строят мультиагентную модель стохастической динамики с метамоделированием и графовым мониторингом job-shop систем [4]. Brochado и соавторы предлагают queue directed graph для расчёта производственных метрик по минимуму данных из MES [5]. Zhang и соавторы применяют reinforcement learning и double-layer Q-learning как механизмы адаптивного управления [6]. Kumbhar и соавторы используют process mining и diagnostic analytics для обнаружения и устранения узких мест на основе цифрового двойника [7].

Постановка проблемы и исследовательский разрыв

Обзор литературы обнаруживает характерную закономерность: большинство работ решает либо задачу цифрового представления процесса, либо задачу локальной оптимизации, либо задачу обнаружения узких мест, либо задачу предиктивного или прескриптивного управления отдельным ресурсом. Однако цельная модель интеллектуального управления потоком ценности, которая одновременно описывает состояние потока, оценивает потери, выявляет узкие места, прогнозирует последствия решений и выбирает управляющее воздействие в замкнутом контуре, встречается редко. Даже наиболее сильные работы обычно ограничиваются одним уровнем: цифровой двойник как инфраструктура, имитационная модель как симулятор, графовая модель как структурное представление или RL как механизм адаптивного управления [1, 2, 4, 5, 6, 7].

Здесь и проявляется ключевой исследовательский разрыв. Для заявленной цели нужна не просто систематизация подходов к цифровизации, а модель, в которой:

- поток ценности описывается как динамическая система;
- потери оцениваются как функция состояния и управляющего воздействия;
- узкие места фиксируются как отдельная переменная состояния или штрафной компонент;
- цифровой двойник обеспечивает онлайн-обновление состояния;

– ИИ-подсистема предсказывает будущее состояние и предлагает решение.

Предлагаемая постановка объединяет элементы цифрового моделирования, оценки потерь и выбора управляющих воздействий в единой задаче оптимизации – попытка связать ранее разрозненные подходы в общий контур.

Предлагаемая математическая модель

Базовая целевая функция

Базовую целевую функцию управления потоком ценности промышленного предприятия запишем в виде:

$$F = \sum_{i=1}^n (\alpha_i \cdot T_i + \beta_i \cdot C_i + \gamma_i \cdot L_i) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где T_i – время выполнения операций или длительность i -го участка потока; C_i – затраты на выполнение i -й операции; L_i – потери, включая простои, брак, ожидание, переналадку и действия, не добавляющие ценности; α_i , β_i , γ_i – весовые коэффициенты, отражающие приоритеты предприятия; n – общее число рассматриваемых операций или участков потока.

Многопериодная динамическая постановка

Для промышленной цифровой среды формулы (1) недостаточно, поскольку поток ценности является динамическим и зависит от состояния системы. Поэтому имеет смысл расширить модель до многопериодной задачи управления:

$$\min_{u_{1:H}} E[\sum_{t=1}^H (\alpha \cdot T_t + \beta \cdot C_t + \gamma \cdot L_t + \delta \cdot WIP_t + \eta \cdot B_t)], \quad (2)$$

где u_t – управляющее воздействие в момент t ; WIP_t – объём незавершённого производства в период t ; B_t – штрафная функция за наличие узкого места или вероятность его возникновения; H – горизонт планирования; δ , η – весовые коэффициенты незавершённого производства и узкого места соответственно.

Система ограничений

Система ограничений задачи (2) включает следующие группы условий:

- баланс материальных потоков на каждой стадии производства;
- ограничения производственной мощности оборудования;
- технологические и маршрутные ограничения на последовательность операций;
- ограничения по численности персонала и сменному режиму работы;
- ограничения на допустимый уровень потерь по качеству;
- ограничения на предельное время пребывания изделия в производственной системе.

Вектор состояния цифрового двойника

Вектор состояния цифрового двойника производственной системы определяется как:

$$X_t = (q_t, r_t, s_t, w_t, m_t, d_t), \quad (3)$$

где q_t – вектор состояния очередей между производственными участками; r_t – вектор доступности ресурсов (оборудование, персонал, материалы); s_t – вектор статусов станков (работа, простой, переналадка, обслуживание); w_t – загрузка незавершённого производства; m_t – показатели надёжности и технического обслуживания; d_t – внешние возмущения спроса и поставок.

Прогностический модуль

Блок прогнозирования потерь на следующий период задаётся в виде функции:

$$\hat{L}_t^{+1} = f(X_t, \theta), \quad (4)$$

где θ – вектор параметров прогностической модели, оцениваемый на исторических данных или обновляемый онлайн. Блок предсказания узкого места формализуется аналогично:

$$\hat{B}_t^{+1} = g(X_t, \varphi), \quad (5)$$

где φ – параметры модели детектирования узкого места. Функции f и g могут быть реализованы посредством регрессионных моделей, искусственных нейронных сетей, методов градиентного бустинга или иных алгоритмов машинного обучения в зависимости от объёма доступных данных и требований к интерпретируемости.

Контур адаптивного управления

Управляющее решение формируется оптимальной политикой:

$$u_t^* = \pi(X_t). \quad (6)$$

Политика π минимизирует ожидаемую функцию цели (2) на горизонте планирования H . На практике π может быть реализована двумя основными способами:

- через reinforcement learning (RL) – если предприятие располагает достаточным числом исторических сценариев; в этом случае политика обучается как решение задачи Марковского процесса принятия решений (MDP);

- через simulation-optimization – если данных мало, а цифровой двойник используется как генератор сценариев для поиска оптимального управляющего воздействия методами стохастической оптимизации.

Замкнутый контур управления образует цикл: цифровой двойник → прогноз потерь и узких мест → оптимизация политики → управляющее воздействие → обновление состояния цифрового двойника. Предложенная модель даёт формализованное описание взаимосвязи показателей состояния и управления и задаёт единый контур управления потоком ценности.

Научная и практическая значимость

Научная значимость предлагаемой модели состоит в том, что она объединяет три часто разрозненных направления: value stream management, bottleneck analysis и intelligent production control – в единой формальной постановке задачи оптимального управления. Это позволяет рассматривать

поток ценности не как статическую карту процессов, а как динамическую управляемую систему с обратной связью.

На практике модель применима для:

- оценки текущего состояния потока ценности на основе данных цифрового двойника;
- выявления узких мест и зон потерь в режиме реального времени;
- выбора управляющих воздействий по критерию минимума суммарных времени, затрат и потерь;
- сценарного сравнения будущих состояний производственной системы;
- построения цифрового двойника как операционной основы для принятия управленческих решений.

Реализация такого подхода предполагает наличие данных о состоянии производственного процесса и требует адаптации модели к условиям конкретного предприятия.

Заключение

Существующие работы по цифровым двойникам и интеллектуальным методам управления, как правило, сосредоточены либо на построении цифровых моделей, либо на решении отдельных задач оптимизации. Постановки, в которых описание состояния системы, прогнозирование и выбор управляющих воздействий объединены в единую схему, встречаются редко.

В работе предложена модель, в которой цифровой двойник формирует вектор состояния (3), модели (4) и (5) прогнозируют потери и узкие места, а алгоритм (6) выбирает управляющее воздействие, минимизирующее целевую функцию (2). Контур пригоден для программной реализации в составе цифровой системы управления производством и может служить основой для последующих эмпирических исследований.

Список использованных источников

1. Митрофанов Е.А., Перерва О.Л. Оптимизация производственных процессов с использованием цифровых двойников // Экономика и предпринимательство. – 2023. – № 4. – DOI: 10.34925/EIP.2023.158.09.169
2. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р. and Бекларян Г.Л. Разработка цифровых двойников для производственных предприятий. – 2019.
3. Столяров А.Д., Гордеев В.В., Абрамов В.И. Цифровые двойники в управлении: отраслевая специфика и практические аспекты создания // Современные наукоемкие технологии. – 2024. – № 7. – С. 48-54. – DOI: <https://doi.org/10.17513/snt.40084>
4. Lee, H., and Yang, H. (September 11, 2023). «Digital Twinning and Optimization of Manufacturing Process Flows.» ASME. J. Manuf. Sci. Eng. November 2023; 145(11): 111008. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4063234>.
5. Brochado, A. F., Rocha, E. M., Almeida, D., de Sousa, A., & Moura, A. (2023). A data-driven model with minimal information for bottleneck detection – application at Bosch thermotechnology. International Journal of Management Science and Engineering Management, 18(4), 318–331. – DOI: <https://doi.org/10.1080/17509653.2022.2116121>.

6. Zhang H. [et al.]/ Reinforcement learning and digital twin-based real-time scheduling method in intelligent manufacturing systems // IFAC-PapersOnLine. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.413>

7. Kumbhar M. [et al.]. A digital twin based framework for detection, diagnosis, and improvement of throughput bottlenecks // Journal of Manufacturing Systems. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.11.016>

A MATHEMATICAL MODEL FOR INTELLIGENT MANAGEMENT OF THE VALUE STREAM IN A DIGITAL PRODUCTION MANAGEMENT SYSTEM FOR AN INDUSTRIAL ENTERPRISE

V.L. Luchinkin

*Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia*

A mathematical model for intelligent value stream management in an industrial enterprise is proposed, combining a description of the flow state, loss assessment and forecasting, and the selection of control actions within the framework of a multi-period optimization problem. Unlike existing approaches, where digital twins and AI tools are applied in isolation, the model forms a unified closed-loop control system. The approach requires validation using data from real production systems.

Keywords: digital twin; value stream management; lean manufacturing; production flow optimization; bottlenecks; artificial intelligence; intelligent control; discrete-event modeling; reinforcement learning.

УДК 658.51

КОНЦЕПЦИЯ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА КАК ИНСТРУМЕНТ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА

С.А. Мампория

*Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна,
г. Санкт-Петербург, Россия*

В условиях проявления социально-экономической нестабильности и неопределенности многие хозяйствующие субъекты с целью повышения устойчивости деятельности, а также обеспечения долгосрочной эффективности, стали рассматривать возможности внедрения обновленных концептуальных бизнес-моделей. В мировой и российской практике оптимизация процессов и развитие системы менеджмента качества стали происходить в условиях внедрения бережливого производства. В статье представлено обоснование взаимосвязи системы бережливого производства с системой менеджмента качества, которые в рамках интеграции могут сформировать единую систему управления.

Ключевые слова: бережливое производство, система менеджмента качества, оптимизация, эффективность, результативность.

В научно-экспертной среде под бережливым производством понимается: «управленческая концепция, объединяющая множество идей, инст-

рументов и методов» [6, с. 288]; «система управления организацией и производственным предприятием, которая основана на постоянном устранении издержек и повышении эффективности его деятельности и конкурентоспособности» [1, с.102]; «концепция организации производства, которая ориентирована на сокращение всевозможных затрат, не создающих ценность для потребителя» [3, с. 29].

Представленные авторские интерпретации указывают на то, что бережливое производство стоит рассматривать в качестве современного инструмента и механизма оптимизации производственных процессов с целью минимизации издержек и потерь, что фактически служит основой повышения не только конкурентоспособности субъекта на рынке, но и его инвестиционной привлекательности в целом.

Сущностные основы бережливого производства в наибольшей степени прослеживаются через цель его внедрения и принципы реализации. Анализ различных исследовательских подходов показал, что основным целевым предназначением внедрения рассматриваемой концепции выступает оптимизация всех производственных процессов, а также логистики и поставок, маркетинга и т.д. Основой повышения эффективности деятельности выступает минимизация потерь в условиях максимизации качества продукции, что фактически стимулирует потребительский спрос. На рисунке 1 наглядно представлены принципы внедрения бережливого производства.



Рисунок 1 – Принципы внедрения бережливого производства

Источник: составлено автором по [4, с. 74]

Представленная информация указывает, что постоянный процесс минимизации и полного устранения потерь – основа концепции бережливого производства. Лидерство по издержкам становится важным конкурентным преимуществом хозяйствующих субъектов в рамках реализации рассмат-

риваемой концепции. Но в условиях ужесточения конкуренции, активной борьбы за рыночные позиции возникает вопрос «конфликта» концепции бережливого производства с еще одним подходом к управлению организацией – системой менеджмента качества (далее также СМК). Рассматриваемый вопрос неоднократно становился предметом исследований. Например, Корзинников А.Д. отмечает, что многие хозяйствующие субъекты посредством устранения противоречий указанных концепций выстраивают интегрированные системы менеджмента качества, дополненные инструментарием бережливого производства, и тем самым, реализуют практически «переход компании на качественно-новый уровень развития, оптимизация себестоимости, ускорение оборачиваемости активов и повышение качественного уровня продукции и оказываемых услуг» [5, с. 42].

В научно-экспертной среде выделяется множество оснований для возникновения рассматриваемых противоречий между СМК и бережливым производством, в том числе: конфликт целей и задач, жесткая формализация СМК против гибкости бережливого производства, дублирование функций, процессов и документации [2]. Несмотря на это, видится целесообразным рассматривать бережливое производство в качестве инструмента развития системы менеджмента качества. Сущностным предназначением именно бережливого производства в данном случае выступает полное устранение всех существующих и потенциальных потерь в производственных и иных процессах, что приводит к последующему увеличению качества продукции. СМК реализуется с целью максимизации качества за счет минимизации потерь и устранения брака. На первый взгляд может показаться, что никакого «конфликта» подходов быть не должно, однако действующая практика хозяйствующих субъектов демонстрирует изолированность реализации бережливого производства и СМК через функционирование различных подразделений, которые взаимодействуют ограниченно. Так, если СМК приоритизирует модернизацию управления в области качества, то бережливое производство преследует своей целью повышение эффективности функционирования производственных систем. Зачастую жесткая формализация, свойственная системе менеджмента качества, функционирующей по стандартам ISO, противоречит адаптивным и гибким принципам бережливого производства. Но при эффективном подходе «синтез» рассматриваемых подходов может послужить основой для развития предприятия, так как многие процессы концепций имеют единую сущностную и целевую основу: нацеленность на удовлетворение потребностей целевой аудитории, стремление к постоянному улучшению и повышению эффективности, оптимизации и снижению издержек. На рисунке 2 наглядно представлена схема, отражающая возможности построения единых систем управления, подразумевающих взаимодействие и оптимальный «синтез» бережливого производства и СМК.

Представленная схема демонстрирует возможности интеграции бережливого производства и СМК в рамках создания ценности продукции. Таким образом, в условиях стремления обеспечить высокое качество (в

рамках СМК) бережливое производство при его оптимальном внедрении может стать дополнительным элементом оптимизации производственных процессов.



Рисунок 2 – Интеграция бережливого производства и СМК
Источник: [2]

Список использованных источников

1. Буянова, А.А. Концепция бережливого производства, как решение проблем на производстве в России / А.А. Буянова // Вестник науки. – 2024. – Т. 3, № 10(79). – С. 102-114. – EDN TRRKDO.
2. ГОСТ Р 57522-2017. Бережливое производство. Руководство по интегрированной системе менеджмента качества и бережливого производства.
3. Дмитриева, А.В. Роль концепции «Бережливого производства» в управлении современным Предприятием / А.В. Дмитриева, А.А. Курбатов // Лучшие научные работы 2026: Сборник статей II Международного научно-исследовательского конкурса, Пенза, 20 февраля 2026 года. – Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2026. – С. 29-31. – EDN FEIBFB.
4. Корзинников, А.Д. Концепция бережливого производства: перспективы, барьеры и стратегии внедрения в наукоемких отраслях России / А.Д. Корзинников // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2026. – Т. 9, № 1(166). – С. 71-79. – DOI 10.36871/ek.up.p.r.2026.01.09.007. – EDN TAYXZQ.
5. Корзинников, А.Д. Управление организацией с применением системы менеджмента качества (СМК) и бережливого производства: синергия двух систем управления / А.Д. Корзинников // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2024. – Т. 7, № 3(144). – С. 35-43. – DOI 10.36871/ek.up.p.r.2024.03.07.004. – EDN CDVRZO.

6. Яковлева, О.С. Бережливое производство – концепция оптимизации потерь производства / О.С. Яковлева, М.А. Емельянов // Теоретические и прикладные исследования в области социально-гуманитарных наук : Материалы XXXI Всероссийской научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 25 ноября 2023 года. – Ростов-на-Дону: Общество с ограниченной ответственностью «Издательство «Манускрипт», 2023. – С. 288-291. – EDN QDATGE.

THE CONCEPT OF SAVING ENERGY AS A TOOL FOR DEVELOPING A QUALITY MANAGEMENT SYSTEM

S.A. Mamporiia

*Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
Saint-Petersburg, Russia*

In the context of socio-economic instability and uncertainty, many business entities have begun to consider the implementation of updated conceptual business models in order to increase their sustainability and ensure long-term efficiency. In global and Russian practice, the optimization of processes and the development of quality management systems have been driven by the implementation of lean production. This article provides a rationale for the relationship between lean production and quality management systems, which can be integrated to form a unified management system.

Keywords: lean production, quality management system, optimization, efficiency, and effectiveness.

УДК 004.6

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПЕРСОНАЛЬНЫХ ДАННЫХ В ТРАНСПОРТНЫХ И СОЦИАЛЬНЫХ ЦИФРОВЫХ СЕРВИСАХ

В.Р. Масалимова, Е.Ю. Царегородцева,
И.П. Насонов, Аксёнова В.М.

*Иркутский государственный университет путей сообщения,
г. Иркутск, Россия*

В статье рассматриваются вопросы обеспечения информационной безопасности персональных данных в транспортных и социальных цифровых сервисах. Проанализированы основные виды обрабатываемых данных, актуальные угрозы их утечки, а также последствия нарушения конфиденциальности информации. Особое внимание уделено современным методам защиты персональных данных и нормативно-правовому регулированию в данной сфере. Показано, что защита информации является важным фактором доверия пользователей и устойчивого развития цифровых сервисов.

Ключевые слова: персональные данные, информационная безопасность, цифровые сервисы, транспорт, киберугрозы, защита информации.

Современные транспортные и социальные сервисы активно развиваются в условиях цифровизации, предоставляя пользователям широкий

спектр услуг: онлайн-покупку билетов, навигацию, каршеринг, электронные социальные услуги. Функционирование данных сервисов невозможно без обработки значительных объёмов персональных данных пользователей. К основным видам обрабатываемых данных относятся [1]:

- идентификационные данные (ФИО, номер телефона, электронная почта);
- платёжные данные (банковские карты, электронные кошельки);
- геолокационные данные;
- информация о перемещениях и предпочтениях пользователей.

Сбор и обработка таких данных создают дополнительные риски, связанные с возможностью их утечки или несанкционированного использования. В условиях роста цифровых сервисов увеличивается и количество киберугроз, направленных на получение персональной информации.

Согласно аналитическим отчётам российских компаний в области информационной безопасности, проблема утечек персональных данных в Российской Федерации носит масштабный характер и демонстрирует устойчивую тенденцию к росту. Так, по данным экспертно-аналитического центра InfoWatch, в 2023 году в сеть было скомпрометировано около 1,12 млрд записей персональных данных, что почти на 60% превышает показатель 2022 года. При этом общее количество крупных утечек составило 95 баз данных (РБК) [2].

Несмотря на некоторое снижение числа инцидентов, их масштаб значительно увеличился: средний объём утечки вырос почти в два раза – с 0,9 млн до 1,7 млн записей на один инцидент (РБК). Более 80% утечек связано с внешними кибератаками, что указывает на высокий уровень активности злоумышленников в отношении российских компаний (РБК) [3].

Дополнительные исследования показывают, что в 2024 году объём скомпрометированных данных превысил 1,5 млрд записей, при этом почти в половине случаев точный масштаб утечки определить невозможно, что свидетельствует о недостаточной прозрачности инцидентов (InfoWatch) [3].

Особую тревогу вызывает тот факт, что значительная доля утечек приходится на цифровые сервисы, включая телекоммуникационные компании, онлайн-платформы и сервисы, связанные с обработкой персональных данных пользователей. В среднем в России на одну утечку приходится около 2,38 млн записей персональных данных, что сопоставимо с мировыми показателями (InfoWatch) [2].

Таким образом, можно сделать вывод, что российские компании функционируют в условиях высокой киберугрозы, а защита персональных данных становится критически важным элементом их деятельности.

Для систематизации основных угроз и методов защиты персональных данных представим обобщённую информацию в виде таблицы.

Представленные данные свидетельствуют о необходимости комплексного подхода к защите персональных данных в цифровых сервисах.

Одним из ключевых направлений обеспечения безопасности является применение современных технологий защиты информации, включая

криптографические методы, системы обнаружения вторжений и многофакторную аутентификацию. Особое значение имеет регулярное обновление программного обеспечения и проведение аудита информационной безопасности.

Таблица 1 – Угрозы персональным данным в цифровых сервисах и меры защиты [1]

Вид угрозы	Описание	Последствия	Методы защиты
Утечка баз данных	Несанкционированный доступ к хранилищам данных	Раскрытие персональной информации	Шифрование данных, контроль доступа
Фишинг	Обман пользователей с целью получения данных	Кража аккаунтов и финансов	Обучение пользователей, 2FA
Вредоносное ПО	Программы для кражи информации	Потеря данных, компрометация систем	Антивирусы, обновление ПО
Перехват данных	Атаки на каналы передачи	Утечка платёжной информации	Использование защищённых протоколов (HTTPS)
Внутренние угрозы	Действия сотрудников	Нарушение конфиденциальности	Разграничение прав доступа, аудит

Важную роль играет нормативно-правовое регулирование. В Российской Федерации основным документом является Федеральный закон №152-ФЗ «О персональных данных», устанавливающий требования к обработке и защите информации. Международные стандарты также предъявляют строгие требования к защите данных пользователей [4].

Таким образом, обеспечение информационной безопасности персональных данных является необходимым условием функционирования современных цифровых сервисов. Повышение уровня защищённости способствует укреплению доверия пользователей и устойчивому развитию цифровой экономики.

В результате проведённого анализа установлено, что рост цифровых сервисов сопровождается увеличением объёмов обрабатываемых персональных данных и, как следствие, ростом киберугроз [5, с. 417].

Обеспечение информационной безопасности персональных данных требует комплексного подхода, включающего технические, организационные и правовые меры. Реализация данных мер позволит минимизировать риски утечек информации и повысить уровень доверия пользователей к цифровым сервисам.

Список использованных источников

1. Shaping Europe's digital future URL: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en> (дата обращения: 29.04.2026).
2. Аналитика информационной безопасности URL: <https://www.infowatch.ru/analytics> (дата обращения: 30.04.2026).
3. Аналитики оценили рост утечек персональных данных в России URL: https://www.rbc.ru/society/11/03/2024/65ec41e89a7947dc41bd43f9?utm_referrer=https%3A%2F%2Fchatgpt.com%2F (дата обращения: 29.04.2026).

4. Федеральный закон «О персональных данных» от 27.07.2006 N 152-ФЗ (последняя редакция) URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_61801/ (дата обращения: 24.04.2026).

5. Правовая защита экономической информации / Е.Ю. Царегородцева, В.Р. Масалимова, И.П. Насонов, В.М. Аксенова // Актуальные проблемы гуманитарных и общественных наук: сборник статей XI Всероссийской научно-практической конференции, Пенза, 18–19 сентября 2025 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2025. – С. 417–421

INFORMATION SECURITY OF PERSONAL DATA IN TRANSPORT AND SOCIAL DIGITAL SERVICES

**V.R. Masalimova, E.Yu. Tsaregorodtseva,
I.P. Nasonov, V.M. Aksenova**

*Irkutsk State Transport University,
Irkutsk, Russia*

This article examines the information security of personal data in transport and social digital services. The main types of processed data, current threats of data leakage, and the consequences of information privacy violations are analyzed. Particular attention is paid to modern methods of personal data protection and legal regulation in this area. It is shown that information security is an important factor in user trust and the sustainable development of digital services.

Keywords: *personal data, information security, digital services, transport, cyber threats, information security.*

УДК 620.22:544.72

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ГИДРОФОБИЗАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ДИСПЕРСНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

А.А. Масленников

*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
г. Санкт-Петербург, Россия*

Систематизированы современные методы гидрофобизации дисперсных металлов Al, Cu, Ni, Fe. Рассмотрены биоинспирированные структуры, лазерное текстурирование, электроосаждение, золь-гель, газофазное и жидкофазное нанесение, а также оригинальные подходы – твердотельный гидридный синтез (ТГС) и наслаивание разноразмерных молекул (НРМ), развитые в Горном университете. Методы сопоставлены по стоимости, применимости к порошкам и достигаемым свойствам. Обсуждены проблемы стабильности покрытий на частицах. Показана перспективность газофазных методов.

Ключевые слова: *дисперсные металлические материалы, гидрофобность, супергидрофобные покрытия, поверхностная модификация, твёрдотельный гидридный синтез.*

Введение

Порошки Al, Cu, Ni, Fe широко используют в металлургии, аддитивных технологиях, композитах, смазках, покрытиях [1]. Высокая удельная поверхность, обеспечивая активность, делает их чувствительными к влаге, вызывая окисление и агломерацию [2, 3]. Придание дисперсным металлам стабильных водоотталкивающих свойств – актуальная задача. Публикаций по гидрофобным покрытиям много [4, 5], но большинство – для компактных образцов; обзоров для порошков мало [6]. Цель – сравнить методы гидрофобизации порошков, оценить их эффективность и ограничения.

Основные методы формирования гидрофобных покрытий на дисперсных металлах

Гидрофобная поверхность металла создаётся двумя путями: формированием развитой иерархической микро- и наношероховатости и последующим нанесением слоя низкоэнергетических соединений – кремнийорганических соединений (силанов, силанов), фторполимеров, высших жирных кислот, длинноцепочечных углеводородов [7]. Для дисперсных материалов оба этапа имеют свою специфику.

Биоинспирированное конструирование иерархических структур (лист лотоса, крылья бабочек) дают сверхвысокие углы смачивания и самоочистку [8, 9]. Структуры получают фотолитографией, шаблонным синтезом или самоорганизацией наночастиц с последующей гидрофобизацией [10]. Для порошков воспроизводимость на каждой частице и масштабирование проблематичны [11].

Лазерное текстурирование позволяет создавать микро- и нанорельеф на металлической поверхности с высокой точностью [12]. Технология даёт возможность независимо варьировать параметры формируемого рельефа – расстояние между канавками, их глубину и форму [13]. Сразу после обработки поверхность обычно гидрофильна; для перехода в супергидрофобное состояние требуется дополнительная химическая модификация (силанами или фторсиланами) либо длительная выдержка на воздухе [14]. Ключевое ограничение для дисперсных материалов заключается в том, что метод не позволяет обрабатывать каждую частицу в объёме сыпучего материала и поэтому практически неприменим для порошков [15].

Электрохимическое осаждение и анодирование формируют пористые, игольчатые или дендритные структуры [16]. Гидрофобизацию завершают стеариновой кислотой или фторсиланами [17]. Для порошков равномерное осаждение на каждой частице требует специальных конструкций.

Золь-гель технология – гидролиз и поликонденсация алкоксидов [2]. Добавление наночастиц контролирует шероховатость, гидрофобизация силанами завершает процесс [4]. Для порошков возможна пропитка, но контроль толщины сложен, прекурсоры дороги [5].

Методы газофазного нанесения (CVD, PVD) даёт высокочистые плотные покрытия [6, 7]. Для порошков нужны модификации (FB-CVD), но оборудование дорогое [8].

Твёрдотельный гидридный синтез и наслаивание разноразмерных молекул

В научной школе Санкт-Петербургского горного университета разработаны два подхода, специально ориентированных на дисперсные металлы и свободных от многих недостатков вышеперечисленных методов.

Твёрдотельный гидридный синтез (ТГС) основан на восстановлении твердых оксидов или галогенидов металлов летучими элементо-водородными соединениями в открытой проточной системе в неравновесных условиях [14, 15].

Наслаивание разноразмерных молекул (НРМ) – последовательная или смесевая хемосорбция катионных ПАВ (триамон C_1-C_2 , алкамон $C_{16}-C_{18}$) из газовой фазы при комнатной температуре [16, 17]. Создаются ультратонкие (субмонослойные, монослойные) покрытия, заполняющие дефекты. Хемосорбция обеспечивает прочную фиксацию молекул модификатора на поверхности металлического материала.

Комбинация ТГС и НРМ позволяет создавать многоуровневые гибридные покрытия, где внутренний слой, сформированный при ТГС, обеспечивает прочную химическую связь с металлом и его термохимическую стабилизацию, а внешний слой, наносимый НРМ, придаёт поверхности требуемый уровень гидрофобности и антифрикционные свойства.

Проблемы долговременной стабильности для дисперсных материалов и пути их решения

Одна из ключевых нерешённых проблем гидрофобных покрытий на порошках – их недостаточная долговременная стабильность. Механическое истирание при транспортировке, ультрафиолетовое излучение и химически агрессивные среды разрушают и иерархический рельеф, и низкоэнергетический слой [8, 10]. Для дисперсных материалов эта проблема стоит острее из-за постоянного межчастичного контакта и абразивного воздействия при транспортировке и переработке.

В литературе предлагаются две основные стратегии повышения стабильности. Первая заключается в использовании адгезионных подслоёв (например, эпоксидных или силановых праймеров), которые обеспечивают более прочное связывание гидрофобного покрытия с металлом [11]. Вторая стратегия связана с созданием самовосстанавливающихся покрытий, в которых при повреждении гидрофобизатор высвобождается из внутренних слоёв или из инкапсулированных микроконтейнеров [13]. Для дисперсных материалов наиболее перспективен первый путь – прочное химическое связывание, реализуемое в методах ТГС и НРМ.

Заключение

Проведённый анализ показывает, что для дисперсных металлических материалов далеко не все известные методы гидрофобизации применимы. Методы, хорошо зарекомендовавшие себя на компактных изделиях (лазерное текстурирование, электрохимическое осаждение), либо неприменимы к порошкам, либо требуют сложной и дорогостоящей адаптации. Наиболее перспективными для порошков являются газофазные методы, и в особен-

ности – твёрдотельный гидридный синтез и наслаивание разноразмерных молекул, поскольку они обеспечивают равномерное модифицирование каждой частицы, высокую адгезию формируемых слоёв за счёт химической связи in-situ и позволяют целенаправленно регулировать состав и структуру покрытия [14, 15]. Дальнейшее развитие этих методов и их комбинирование с другими подходами откроет путь к новым материалам с улучшенными и стабильными функциональными свойствами.

Список использованных источников

1. Ramezani M., Ripin Z.M., Pasang T., Jiang C.P. Surface Engineering of Metals: Techniques, Characterizations and Applications // *Metals*. 2023. Vol. 13, Iss. 7. P. 1299. DOI: 10.3390/met13071299.
2. Ellinas K., Dimitrakellis P., Sarkiris P., Gogolides E. A Review of Fabrication Methods, Properties and Applications of Superhydrophobic Metals // *Processes*. 2021. Vol. 9, Iss. 4. P. 666. DOI: 10.3390/pr9040666.
3. Dong G., Wei S., Wang B. et al. Research progress on micro/nano materials and low surface energy modification in superhydrophobic coatings // *Nano Materials Science*. 2026. DOI: 10.1016/j.nanoms.2025.01.008.
4. Psarski M. Metallic superhydrophobic nanostructures via bottom-up synthesis: design, functionality, and applications // *Nanotechnology*. 2025. Vol. 36, Iss. 41. 412001. DOI: 10.1088/1361-6528/ae09b4.
5. Conradi M., Kocijan A., Klobčar D. Wettability and friction control of a stainless steel surface by combining nanosecond laser texturing and adsorption of superhydrophobic nanosilica particles // *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8, Iss. 1. P. 7457. DOI: 10.1038/s41598-018-25850-6.
6. Wang G. et al. Wettability transition methods for metal surface after laser processing // *Optics & Laser Technology*. 2025. Vol. 191. 113406. DOI: 10.1016/j.optlastec.2025.113406.
7. Zhou J., Wu J., Tang S., Li Y. Review of Laser Texturing Technology for Surface Protection and Functional Regulation of Aluminum Alloys // *Coatings*. 2025. Vol. 15, Iss. 5. 567. DOI: 10.3390/coatings15050567.
8. Li W., Yang H., Xue S. et al. A simple strategy towards construction of fluorine-free superhydrophobic aluminum alloy surfaces // *Applied Physics A*. 2022. Vol. 128, Iss. 7. 626. DOI: 10.1007/s00339-022-05682-8.
9. Pandit S.K., Yadav K., Chauhan P., Kumar A. Accessing the corrosion resistance for metallic surfaces using long-chain fatty acids // *RSC Applied Interfaces*. 2025. Vol. 2, Iss. 5. P. 1359. DOI: 10.1039/D5LF00125K.
10. Fang X., Zhu Q., Chen Y., Wu G., Du X. Review: electrochemical preparation of superhydrophobic coatings on metal surfaces and their applications // *Journal of Materials Science*. 2025. Vol. 21, Iss. 12. P. 8602-8631. DOI: 10.1007/s10853-025-10781-3.
11. Recent advances in fluorine-free superhydrophobic materials for corrosion protection and oil capture applications // *Progress in Organic Coatings*. 2025. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2025.109123.
12. Bai X. et al. Structural Self-Healing Superhydrophobic Surfaces: Healing Mechanisms, Methods, and Future Challenges // *Advanced Materials Interfaces*. 2025. e202500935. DOI: 10.1002/admi.202500935.

13. Xing S., Zhang C., Zhu Q. Review of Preparation Methods for Micro-Nano Structured Superhydrophobic Surfaces: Formation Mechanisms, Performance Simulation, and Process Analysis // *Nanoscale*. 2026. DOI: 10.1039/D5NR04685H.

14. Syrkov A.G., Prokopchuk N.R. Dispersed Iron Obtaining by the Method of Solid-State Hydride Synthesis and Problem of Hydrophobicity of Metal // *CIS Iron and Steel Review*. 2021. Vol. 21, Iss. 1. P. 16-22. DOI: 10.17580/cisr.2021.02.03.

15. Yachmenova L.A., Syrkov A.G., Kabirov V.R. Features of obtaining surface-modified metals with minimal carbon footprint // *Non-ferrous Metals*. 2023. No. 2. P. 33-40. DOI: 10.17580/nfm.2023.02.06.

16. Syrkov A.G., Kabirov V.R., Pomogaybin A.P., Ngo Q.K. Electrophilic-nucleophilic properties and hydrophobicity of surface-modified metals // *Condensed Matter and Interphases*. 2021. Vol. 23, Iss. 2. P. 282-290. DOI: 10.17308/kcmf.2021.23/3365.

17. Syrkov A.G., Taraban V.V., Kabirov V.R., Silivanov M.O. Stabilization of disperse metals by nitrogen-containing tensides with different-sized molecules // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1313, Iss. 1. P. 012052. DOI: 10.1088/1742-6596/1313/1/012052.

MODERN APPROACHES TO HYDROPHOBIZATION OF THE SURFACE OF DISPERSED METALLIC MATERIALS

A.A. Maslennikov

*Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
Saint Petersburg, Russia*

Modern methods for hydrophobization of dispersed metals Al, Cu, Ni, Fe are systematized. Bioinspired design, laser texturing, electrochemical deposition, sol-gel, gas-phase and liquid-phase deposition, as well as solid-state hydride synthesis (SHS) and molecular layering of different-sized molecules (MLDM) developed at the Mining University are considered. Methods are compared by cost, applicability to powders and achievable properties. Stability problems are discussed. The promise of gas-phase methods is shown.

Keywords: *dispersed metallic materials, hydrophobicity, superhydrophobic coatings, surface modification, solid-state hydride synthesis.*

УДК 630.36:621.43

ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ ТЕХНИКИ НА ГИБРИДНОЙ ТЯГЕ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛЕСА: ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ И ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ

В.В. Махнушко, Д.О. Чернышев, А.И. Шкаленко

*Уральский государственный лесотехнический университет,
г. Екатеринбург, Россия*

В статье рассматриваются конструктивные особенности, эксплуатационные преимущества и недостатки лесозаготовительной техники на гибридной тяге.

Проведён анализ отечественного и зарубежного опыта внедрения гибридных харвестеров и форвардеров, выявлены ключевые технические и экономические проблемы, сдерживающие распространение данного класса машин в условиях российского леса. Предложены направления совершенствования конструкций и системы эксплуатации.

Ключевые слова: гибридная тяга, лесозаготовительная техника, харвестер, форвардер, рекуперация энергии, электропривод, экологичность, производительность, трансмиссия.

Лесозаготовительная отрасль относится к числу наиболее энергоёмких секторов лесного хозяйства. Традиционные многооперационные машины – харвестеры и форвардеры – оснащены мощными дизельными двигателями, потребляющими значительное количество топлива при интенсивной работе. В условиях ужесточения экологических требований, роста стоимости дизельного топлива и необходимости снижения углеродного следа лесозаготовительных предприятий гибридная тяга становится одним из приоритетных направлений технического прогресса в отрасли. Каренцников В.А. и Даренкова Н.Н. констатируют, что экспериментальные разработки в лесной сфере всё активнее ориентированы на альтернативные источники энергии и комбинированные силовые установки (Симочко В.В. и Чечиль Е.В. относят гибридные машины к числу ключевых новинок лесозаготовительной техники ближайшего десятилетия, подчёркивая их потенциал в снижении операционных затрат [6] (Симочко В.В., Чечиль Е.В..., 2025).

Понятие «гибридная тяга» в применении к лесным машинам подразумевает совместное использование двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и одного или нескольких электродвигателей, питаемых от тяговых аккумуляторных батарей или суперконденсаторов. Принципиальное отличие от полностью электрических машин состоит в том, что ДВС сохраняется в качестве основного или резервного источника энергии, что особенно важно в условиях отдалённых лесосек, где зарядная инфраструктура отсутствует. Добрецов Р.Ю., Дмитриев А.С., Черемисин К.В., Ревяко С.И. и Григорьев И.В. разработали управляемый межосевой механизм распределения мощности трансмиссии лесных колёсно-гусеничных машин, обеспечивающий оптимальное перераспределение крутящего момента между осями в зависимости от дорожных условий, что создаёт предпосылки для интеграции электропривода в силовой контур подобных машин [1] (Системы. Методы. Технологии...., 2023).

Среди зарубежных производителей лесозаготовительной техники наиболее активно в сфере гибридных решений работают компании Ponsse (Финляндия), John Deere (США) и Komatsu Forest (Швеция). Харвестер Ponsse Bear оснащён системой рекуперации энергии при опускании стрелы манипулятора: гидравлическая энергия преобразуется в электрическую и накапливается в суперконденсаторах, откуда расходуется при подъёме. Это позволяет сократить расход топлива на 10–15% по сравнению с базой

вой моделью. John Deere в серии 900 применяет интеллектуальное управление дизельным двигателем с отключением цилиндров в режиме холостого хода и рекуперацией при торможении. Komatsu Forest реализовала в форвардере 895 систему электрического привода задних мостов, при которой передние оси приводятся от ДВС, а задние – от электромотора, питаемого генератором. Это решение существенно улучшило тягово-сцепные качества машины на скользком грунте.

Отечественный опыт в данной области пока значительно скромнее. Российские предприятия, в частности Онежский тракторный завод и АО «Кировский завод», в разные годы проводили опытно-конструкторские работы по созданию лесных машин с электрогидравлическими трансмиссиями, однако до серийного производства гибридных харвестеров или форвардеров отечественные разработчики не дошли. Основным препятствием называется высокая стоимость тяговых батарей и силовой электроники, а также недостаточная адаптация зарубежных компонентов к условиям российского бездорожья и экстремальных температур. Вместе с тем научные исследования в этой области ведутся достаточно интенсивно. Егорин А.А., Петросян С.С., Андронов А.В., Хитров Е.Г. и Степанищева М.В. провели детальный анализ эксплуатационных характеристик современных харвестеров, в том числе с точки зрения энергетической эффективности различных режимов работы, что закладывает методическую базу для оценки потенциала гибридизации [2] (Системы. Методы. Технологии..., 2021).

Производительность является одним из главных критериев оценки любой лесозаготовительной машины. Савиных Т.И., Савиных М.А. и Якимович С.Б. провели сравнительный анализ способов заготовки древесины харвестером и установили, что удельная энергоёмкость существенно варьируется в зависимости от породного состава, объёма хлыста и метода раскряжёвки [5] (Савиных Т.И., Савиных М.А., Якимович С.Б...2021). Гибридные машины потенциально способны снизить удельную энергоёмкость за счёт рекуперации, однако реализация этого потенциала зависит от квалификации оператора. Смертин С.А. и Сулейманов Д.А. показали, что разница в производительности между начинающими и опытными операторами харвестера на тренажёре достигает 30–40%, причём для гибридных машин этот разрыв, по всей видимости, ещё выше, поскольку управление силовым потоком требует дополнительных компетенций [7] (Смертин С.А., Сулейманов Д.А...2021).

Хитров Е.Г., Андронов А.В., Егорин А.А. и Петросян С.С. разработали мультифакторную классификацию современных харвестеров, охватывающую свыше 200 параметров машин различных производителей [8] (Мультифакторная классификация современных харвестеров. 21.12.2021). Анализ этой базы данных показывает, что в сегменте машин мощностью от 170 до 250 кВт – наиболее массовом для промышленных рубок – потенциал экономии топлива при гибридизации составляет 12–18%, а снижение пиковой нагрузки на ДВС позволяет увеличить его ресурс на 15–20%.

**Таблица 1. Сравнительные характеристики
гибридных и традиционных харвестеров**

Параметр Parameter	Традиционный харвестер Traditional harvester	Гибридный харвестер Hybrid harvester
Расход топлива, л/маш.-ч Fuel consumption, l/mash-h	22–30	17–24
Снижение расхода топлива,% Reduction of fuel consumption, %	–	10–20
Уровень шума двигателя, дБА Engine noise level, dBA	78–85	68–76
Ресурс ДВС до капремонта, моточас Resource DV	8 000–10 000	10 000–13 000
Стоимость машины (индекс) Cost of the car (index)	1,0	1,3–1,5
Затраты на обслуживание (индекс) Maintenance costs (index)	1,0	1,15–1,25
Масса дополнительного оборудования, кг Weight of additional equipment, kg	–	400–900
Срок окупаемости, лет Payback period, years	5–7	7–10

Данные таблицы 1 свидетельствуют о противоречивой природе гибридных решений: при очевидном снижении расхода топлива и уровня шума первоначальные затраты и масса машины возрастают, что имеет принципиальное значение для работы на слабонесущих грунтах. Чайка О.Р. и Журавлев В.В. акцентировали внимание на взаимосвязи между массой харвестерного оборудования и глубиной колеи, образуемой машиной при несплошных рубках: каждые 10% прироста массы увеличивают давление на грунт на 6–8%, что критично для сохранения лесной среды [9](Чайка О.Р., Журавлев В...2021). Следовательно, увеличение массы гибридного борта на 400–900 кг требует конструктивной компенсации – применения шин сверхнизкого давления, гусеничных приставок или активного управления распределением нагрузки по осям.

Ключевым узлом при использовании гибридной системы, является блок принятия решений о переключении режимов: при достаточном заряде аккумулятора машина переходит на чисто электрическую тягу, снижая нагрузку на ДВС и уровень шума. Это особенно актуально при работе в охраняемых природных территориях и вблизи населённых пунктов, где акустические ограничения имеют нормативный характер.

Система рекуперации энергии при торможении и опускании стрелы манипулятора является технически наиболее отработанным элементом гибридного привода применительно к лесным машинам. В харвестере типовой рабочий цикл включает 40–60 движений манипулятором в час, при этом на фазу опускания груженой стрелы приходится до 25% общих потерь энергии. Рекуперация этой энергии позволяет частично компенсиро-

вать расход топлива на последующие подъёмные операции. Шредер А.Д. установил, что у начинающих операторов продолжительность отдельных фаз цикла обработки дерева на 35–50% превышает таковую у опытных, что ведёт к непропорционально высоким потерям рекуперированной энергии в начальный период эксплуатации машины [10](Шредер А.Д...2021).

Важным аспектом является интеграция гибридного привода с системой машин «Харвестер + Форвардер». Ширнин Ю.А., Гайсин И.Г., Рыганова С.Г. и Гатауллин А.Р. показали, что оптимизация порядка выполнения технологических операций в данной системе позволяет значительно сократить холостые пробеги и время ожидания форвардера, что напрямую влияет на суммарный расход топлива [11](Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование...2021). Применение гибридных форвардеров с возможностью накопления энергии во время стоянки под нагрузкой и последующего использования при движении по лесосеке теоретически позволяет снизить расход топлива на 15–22% по сравнению с традиционными машинами в аналогичных условиях.

Климатические условия России создают специфические проблемы для гибридных машин. Литий-ионные тяговые батареи при температуре ниже -20°C теряют до 40% ёмкости, а при -30°C их эффективная ёмкость снижается вдвое. Для Сибири и севера Европейской России, где ведётся значительная часть промышленных рубок, это означает фактическое отключение электрической составляющей привода в наиболее продуктивный зимний период. Решением может служить применение систем термостатирования батарей с использованием тепла охлаждающей жидкости ДВС, а также применение аккумуляторов на основе литий-железо-фосфатной химии (LiFePO_4), демонстрирующих лучшую морозостойкость по сравнению с традиционными NMC-элементами. Савиных Т.И., Савиных М.А. и Санталов А.А. отметили, что сохранность лесной среды при зимней заготовке существенно выше, чем в летний период, поскольку промёрзший грунт выдерживает значительно большие нагрузки [4](Савиных Т.И., Савиных М.А., Санталов А.А...2021). Соответственно, снижение эффективности гибридного привода именно зимой частично компенсируется улучшением условий для применения тяжёлой техники.

Перспективным направлением развития гибридных лесных машин является внедрение телематических систем управления энергопотоком с элементами машинного обучения. Такие системы способны анализировать рельеф лесосеки и прогнозировать рабочие циклы оператора для заблаговременной подготовки оптимального режима работы силовой установки. Ряд производителей уже интегрирует подобные решения в свои флагманские модели, позиционируя их как «умные гибриды». Практика показывает, что прирост эффективности от интеллектуального управления по сравнению с простой гибридной схемой составляет дополнительные 5–8% экономии топлива.

Анализ совокупности преимуществ и недостатков гибридной лесозаготовительной техники позволяет сформулировать следующие основные выводы. Гибридная тяга обеспечивает реальное снижение расхода топлива

в диапазоне 10–20%, сокращение уровня шума на 7–12 дБА, продление ресурса ДВС и улучшение тягово-сцепных качеств машин на труднопроходимых участках. Вместе с тем высокая первоначальная стоимость, увеличение массы конструкции, ограниченная работоспособность аккумуляторов при низких температурах и повышенные требования к квалификации персонала ограничивают темпы распространения данного класса техники. Для условий России принципиально важно создание отечественной элементной базы силовой электроники, адаптированной к арктическому климату, а также разработка национальных стандартов и методик оценки экономической эффективности гибридных лесных машин.

Вектор развития мировой лесозаготовительной техники однозначно направлен в сторону электрификации и гибридизации. Технический прогресс в области аккумуляторных технологий, снижение стоимости тяговых батарей и ужесточение экологических стандартов в большинстве лесозаготовительных стран сделают гибридные машины экономически конкурентоспособными с традиционными уже в горизонте 5–8 лет. Для отечественных предприятий лесного комплекса это означает необходимость заблаговременной подготовки технических специалистов, формирования ремонтной базы и выработки стратегии постепенного перехода парка машин на новую энергетическую архитектуру.

Список использованных источников

1. Добрецов Р.Ю., Дмитриев А.С., Черемисин К.В., Ревяко С.И., Григорьев И.В. Управляемый межосевой механизм распределения мощности трансмиссии лесных колесно-гусеничных машин // Системы. Методы. Технологии. – 2023. – № 1 (57). – С. 43-48.
2. Егорин А.А., Петросян С.С., Андронов А.В., Хитров Е.Г., Степанищева М.В. Анализ эксплуатационных характеристик современных харвестеров // Системы. Методы. Технологии. – 2021. – № 4 (52). – С. 127-131.
3. Каренцников В.А., Даренкова Н.Н. Experimental machinery in forestry sphere // В сборнике: Наука на иностранном языке – шаг в будущее профессионала. Материалы II Национального (Всероссийского) круглого стола. – Санкт-Петербург, 2025. – С. 200-206.
4. Савиных Т.И., Савиных М.А., Санталов А.А. Сравнительная оценка способов заготовки древесины харвестером по критериям производительности и сохранности лесной среды // В сборнике: Научное творчество молодежи – лесному комплексу России. Материалы XVII Всероссийской (национальной) научно-технической конференции. – Екатеринбург, 2021. – С. 48-50.
5. Савиных Т.И., Савиных М.А., Якимович С.Б. Сравнительный анализ способов заготовки древесины харвестером по критерию производительности и удельной энергоемкости // Леса России и хозяйство в них. – 2021. – № 4 (79). – С. 69-74.
6. Симочко В.В., Чечиль Е.В. Машины будущего: обзор новинок лесозаготовительной техники // В сборнике: Актуальные вопросы науки 2025. Сборник статей X Международной научно-практической конференции. – Пенза, 2025. – С. 45-47.
7. Смертин С.А., Сулейманов Д.А. Сравнение работы оператора харвестера в различных режимах на тренажере многооперационной лесозаготовительной машины // В сборнике: Научное творчество молодежи – лесному комплексу России.

Материалы XVII Всероссийской (национальной) научно-технической конференции. – Екатеринбург, 2021. – С. 50-52.

8. Хитров Е.Г., Андронов А.В., Егорин А.А., Петросян С.С. Мультифакторная классификация современных харвестеров // Свидетельство о регистрации базы данных RU 2021623080, 21.12.2021. Заявка № 2021623058 от 14.12.2021.

9. Чайка О.Р., Журавлев В.В. Обоснование параметров технологического оборудования харвестеров для несплошных рубок леса // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2021. – № 2. – С. 39-40.

10. Шредер А.Д. Сравнение элементов цикла обработки дерева на харвестере начинающими и опытным операторами // В сборнике: Научное творчество молодежи – лесному комплексу России. Материалы XVII Всероссийской (национальной) научно-технической конференции. – Екатеринбург, 2021. – С. 55-57.

11. Ширнин Ю.А., Гайсин И.Г., Рыганова С.Г., Гатауллин А.Р. Сравнение и выбор вариантов выполнения элементов технологических операций при работе системы машин «Харвестер+Форвардер» // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. – 2021. – № 2 (50). – С. 42-51.

ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF HYBRID-DRIVE MACHINERY IN FOREST EXPLOITATION CONDITIONS: DOMESTIC AND FOREIGN EXPERIENCE

V.V. Makhnushko, D.O. Chernyshev, A.I. Shkalenko

*Ural State Forestry Engineering University,
Yekaterinburg, Russia*

The article examines the design features, operational advantages and disadvantages of hybrid-drive forest harvesting machinery. An analysis of domestic and foreign experience in implementing hybrid harvesters and forwarders has been carried out; key technical and economic problems constraining the spread of this class of machines in Russian forest conditions are identified. Directions for improving designs and operational systems are proposed based on practical examples and current publications.

Keywords: *hybrid drive, forest harvesting machinery, harvester, forwarder, energy recovery, electric drive, environmental friendliness, productivity, transmission.*

УДК 621.3.049.75

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОВЕРХНОСТНОГО МОНТАЖА ПЕЧАТНОГО УЗЛА

П.А. Мельник

*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия*

В работе рассматривается оптимизация операции нанесения паяльной пасты при поверхностном монтаже печатного узла. Действующий процесс предусматривает ручное дозирование пасты шприцем на металлизированные отвер-

ствия, что приводит к нестабильности объёма и зависимости качества от квалификации оператора. Предложена замена ручного дозирования на трафаретную печать с использованием полуавтоматического принтера. Показано, что предлагаемое решение повышает воспроизводимость нанесения пасты, снижает риск дефектов паяных соединений и сокращает время операции.

Ключевые слова: поверхностный монтаж, паяльная паста, трафаретная печать, дозирование, технологический процесс, дефекты пайки.

Введение

Нанесение паяльной пасты является одной из наиболее критичных операций поверхностного монтажа (SMT): на этом этапе формируются предпосылки к возникновению большинства дефектов, обнаруживаемых после оплавления [1].

В рассматриваемом печатном узле на жесткой части платы расположены металлизированные отверстия диаметром 0,5 мм, которые выполняют две ключевые функции: обеспечивают электрическое соединение между слоями многослойной платы и служат посадочными местами для выводов компонентов. Надежность паяного соединения в таких отверстиях напрямую зависит от их полного заполнения припоем.

Действующий технологический процесс (ТП) предусматривает два метода нанесения пасты: трафаретную печать для контактных площадок (с использованием принтера TWS Automation SR 2700) и ручное дозирование шприцем для металлизированных отверстий. Трафарет, применяемый для печати на основных площадках, не содержит апертур под данные отверстия, что и обуславливает необходимость отдельной операции ручного дозирования. Ручная операция является «узким местом» с точки зрения воспроизводимости и производительности.

Цель работы – анализ действующего ТП и обоснование замены ручного дозирования на трафаретную печать.

Анализ действующего технологического процесса

Согласно действующему ТП, поверхностный монтаж ведётся последовательно на обеих сторонах платы. Для нанесения пасты на контактные площадки применяется трафаретная печать на принтере TWS Automation SR 2700. Дополнительно, после трафаретной печати, предусмотрено ручное дозирование пасты шприцем на металлизированные отверстия.

Необходимость заполнения данных отверстий пастой обусловлена двумя факторами. Во-первых, при оплавлении паяльной пасты расплавленный припой под действием капиллярных сил может «уйти» из паяного соединения в пустое металлизированное отверстие, что приведет к дефекту «голодная пайка». Во-вторых, полное заполнение отверстия припоем обеспечивает механическую прочность соединения, что особенно важно для плат, работающих в условиях вибраций и температурных циклов.

Операция ручного дозирования включает: очистку шприца, заполнение пастой, нанесение на отверстия с параметром 0,1 с. Анализ операции выявил следующие недостатки:

- нестабильность объёма дозы (зависимость от давления, вязкости и навыка оператора);
- высокая трудоёмкость подготовки и очистки шприца;
- низкая воспроизводимость при смене оператора;
- невозможность объективного документирования параметров.

Предложение по оптимизации

Характеристика предлагаемого решения

Предлагается отказаться от ручного дозирования и выполнять нанесение пасты на металлизированные отверстия на том же трафаретном принтере TWS Automation SR 2700, который уже применяется для контактных площадок. Для этого необходимо скорректировать трафарет, добавив апертуры под отверстия, и внести изменения в ТП. Технические характеристики принтера SR 2700 подробно описаны в руководстве по эксплуатации [2].

Учитывая малую ширину жесткой части платы (2 мм), для обеспечения надежной фиксации в процессе трафаретной печати предлагается использовать технологическую паллету с вырезами под каждую плату. Это позволит исключить смещение платы при совмещении с трафаретом и отрыве после печати.

Обоснование предложения с точки зрения качества паяных соединений

Согласно «Атласу дефектов паяных соединений» [1] и результатам анализа производственного процесса, наиболее распространёнными дефектами, обусловленными ненадлежащим нанесением пасты, являются: «голая пайка», перемычки, эффект «надгробного камня» и шарики припоя.

В условиях ручного дозирования эти дефекты возникают из-за неконтролируемого объёма выдавливаемой пасты. Особенно критична эта проблема для отверстий диаметром 0,5 мм: слишком малый объём не заполнит отверстие, а избыточный создаст перемычки.

Применение трафаретной печати устраняет данную причину: объём пасты определяется геометрией апертуры и толщиной трафарета, что обеспечивает высокую повторяемость от платы к плате и исключает влияние человеческого фактора. При этом изделие соответствует требованиям ОСТ В95 2302-82 [3] к качеству паяных соединений.

Сравнительный анализ и экспериментальная оценка эффективности предложенного решения

Для количественного подтверждения эффективности предложенного решения проведён эксперимент. Контрольная группа (3 платы) – ручное дозирование, экспериментальная (3 платы) – трафаретная печать. Параметры нанесения пасты на 20 отверстий (диаметр 0,5 мм) сведены в таблицу 1.

Замена ручного дозирования на трафаретную печать позволяет снизить коэффициент вариации с 0,23 до 0,06 (улучшение в 4 раза) и сократить время выполнения операции в 4,4 раза.

Для оценки влияния на качество готовых изделий проведён анализ результатов выходного контроля 50 плат, изготовленных с использованием

ручного дозирования, и 50 плат, изготовленных по модифицированному процессу. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Сравнение результатов нанесения пасты

Параметр	Ручное дозирование	Трафаретная печать
Время нанесения, мин	4,4	1,0
Средняя площадь отпечатка, мм ²	0,171	0,193
Разброс площади (min-max), мм ²	0,086-0,267	0,172-0,212
Коэффициент вариации	0,23	0,06
Доля дефектных отпечатков, %	17	<1

Таблица 2 – Сравнение качества паяных соединений

Показатель	Ручное дозирование (50 плат)	Трафаретная печать (50 плат)
Доля плат с дефектами пайки (внешний осмотр)	14%	2%
Доля плат, забракованных по электрическим параметрам	2%	0%
Основные типы дефектов	«Голодная пайка», перемычки	Единичные нарушения

Таким образом, доля дефектных изделий снижена с 16% до 2% (улучшение в 8 раз), что коррелирует с уменьшением доли дефектных отпечатков пасты с 17% до менее 1%. Это подтверждает прямую связь качества нанесения пасты с выходом годных изделий.

Заключение

Проведён анализ действующего технологического процесса сборки печатного узла. Выявлено, что ручное дозирование паяльной пасты на металлизированные отверстия является наименее стабильной операцией. Предложена замена ручного дозирования на трафаретную печать с использованием принтера SR 2700.

Обосновано, что металлизированные отверстия диаметром 0,5 мм требуют точного и воспроизводимого заполнения пастой для обеспечения надежного электрического контакта между слоями платы и предотвращения дефектов пайки.

Экспериментально подтверждено, что предлагаемое решение обеспечивает снижение коэффициента вариации объёма пасты с 0,23 до 0,06, уменьшение доли дефектов с 17% до менее 1%, сокращение времени операции в 4,4 раза и снижение доли дефектных изделий с 16% до 2%. Реализация предложения требует корректировки трафарета и изменений в операционной карте ТП.

Список использованных источников

1. Калиниченко Н.П., Викторова М.О. Атлас дефектов паяных соединений: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 83 с.

2. TWS Automation SR 2700: руководство по эксплуатации. – TWS Automation. – 42 с.

3. Военный стандарт ОСТ В95 2302-82. Аппаратура микроэлектронная. Пайка выводов электрорадиоизделий на печатные платы. Типовые технологические процессы. Общие технические требования к качеству паяных соединений; введ. 01.07.82. – 2021. – 88 с.

OPTIMIZATION OF THE SMT PROCESS FOR PCBA

P.A. Melnik

*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Ekaterinburg, Russia*

This paper considers the optimization of the solder paste application operation in surface mount assembly of a printed circuit board. The current process involves manual dispensing of paste onto plated holes using a syringe, which leads to volume instability and dependence of quality on operator skill. The replacement of manual dispensing with stencil printing using a semi-automatic printer is proposed. It is shown that the proposed solution improves paste deposition repeatability, reduces the risk of solder joint defects, and decreases operation time.

Keywords: surface mount technology, solder paste, stencil printing, dispensing, manufacturing process, soldering defects.

УДК 631.331.02

КРАТКИЙ ОБЗОР СТЕРНЕВЫХ СЕЯЛОК И ИХ СОШНИКОВ

Н.С. Минеев¹, П.Н. Хорев¹, М.А. Терехин²

¹*Пензенский государственный аграрный университет,
г. Пенза, Россия*

²*АО «Радиозавод», г. Пенза, Россия*

В статье представлен обзор современных стерневых зерновых сеялок и анализ конструкций их сошников. Рассмотрены сеялка-культиватор СКП-2,1 с лаповым сошником, ее модификация СКП-2,1Д с долотовидным сошником, дисковая сеялка «Авангард» с двухдисковым сошником и механическая сеялка John Deere 1590 с однодисковым сошником. Выявлены конструктивные особенности каждого типа сошников, их преимущества и недостатки при работе по стерневым фонам при минимальной и нулевой обработках почвы.

Ключевые слова: стерневая сеялка, лаповый сошник, долотовидный сошник, двухдисковый сошник, однодисковый сошник, минимальная обработка почвы, нулевая обработка почвы, прикатывание.

Сеялка-культиватор для полосового посева СКП-2,1 (рисунок 1) предназначена для посева зерна и зернобобовых культур полосой 6...8 см без предварительной предпосевной культивации почвы. Одновременно с посевом семян осуществляет внесение минеральных гранулированных удобрений.

ний в борозду с последующим прикатыванием посевов [1,2]. Сеялка-культиватор СКП-2,1 нашла широкое применение в зонах с недостаточным увлажнением, а также при посеве в почвы, подверженной ветровой эрозии. Сеялка СКП-2,1 и ее модификации обеспечивают приемлемое качество посева при влажности почвы до 25 % и ее твердости до 20 кг/см². Сеялка агрегируется с тракторами тягового класса 1.4, однако производителем предусмотрена универсальная сцепка, позволяющая объединять до 5 сеялок в один посевной агрегат [1,2].



Рисунок 1 – Сеялка-культиватор СКП-2,1

Общий вид сошника сеялки СКП-2,1 представлен на рисунке 2. Сошник состоит из стрелчатой лапы 1, закрепленной на стойке 2. Стойка 2 шарнирно установлена в кронштейне 3, на котором смонтирован рычаг 4 с пружиной 5. Регулировка положения сошника производится гайками 6 и 7.

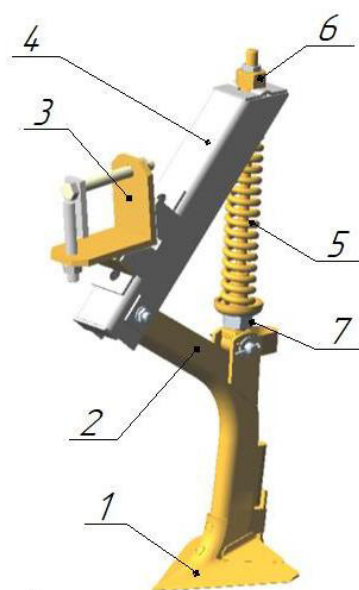


Рисунок 2 - Сошник СКП.08.00.00 сеялки-культиватора СКП-2,1:
1 – лапа стрелчатая; 2 – стойка; 3 – кронштейн; 4 – рычаг;
5 – пружина; 6, 7 – гайка регулировочная

Модификация сеялок СКП-2,1Д (рисунок 3) разработана компанией «Диборагроماش» на базе сеялки СКП-2,1 и отличается рабочими органами, задней колесной рамкой и увеличенным зернотуковым ящиком. Главной отличительной чертой сеялки СКП-2,1Д является то, что взамен лаповых сошников на брусах рамы смонтирован долотовидный сошник, позволяющий проводить нулевую обработку почвы и рядковый посев культур. Взамен прикатывающей батареи катков с кольчато-шпоровыми катками установлена прикатывающая батарея катков с клиновыми катками. Имеется модификация сеялки ВСКП-2,1Д, отличающаяся установленным вариатором в механизме привода высевающих аппаратов [1, 3].

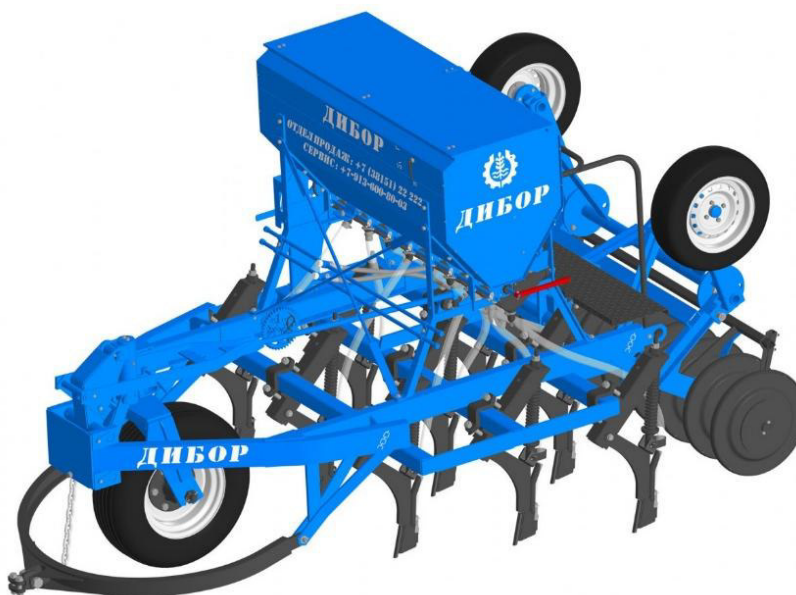


Рисунок 3 – Зерновая сеялка СКП-2,1Д с долотовидными сошниками

Долотовидный сошник служит для создания в почве бороздки для укладки на ее дно семенного материала и минеральных удобрений. Рабочий орган оснащен пластиной из вольфрамового сплава. Долотовидный сошник обрабатывает лишь 20% площади почвы, однако этого достаточно, чтобы совершить необходимые операции и гарантировать качество посева. Сошником формируется небольшая аккуратная бороздка, в созданное плотное ложе укладывается семя. Сбереженный пласт становится питательной основой для всходов. Таким образом, сеялка СКП-2,1Д для посева зерновых культур по максимуму использует имеющиеся почвенные ресурсы, не нанося вред почве и сохраняя ее плодородность.

Сошник (рисунок 4) состоит из стойки 2, в нижней части которой имеется семянаправитель 8. Долото 1 крепится к стойке 2 с помощью двух болтов. Стойка 2 шарнирно установлена в кронштейне 4, который с помощью хомута 3 и болтов жестко закрепляется на брусce рамы. Пружина 5 служит предохранительным устройством сошника. Регулировка натяжения пружины 5 и положения стойки 2 производится с помощью гаек 6, аналогично как у лаповых сошников сеялки СКП-2,1 [3].

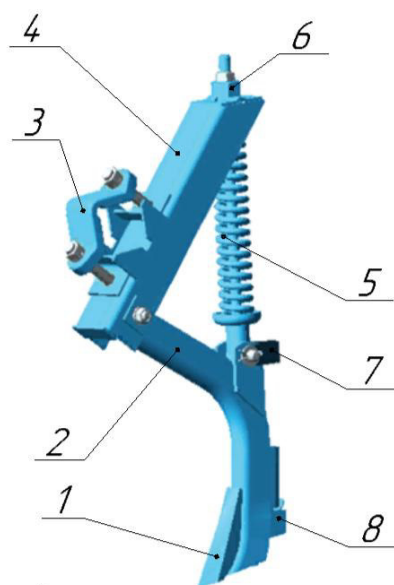


Рисунок 4. Сошник долотовидный сеялки СКП-2,1Д:

1 – долото твердосплавное; 2 – стойка; 3 – механизм крепления сошника к бусу сеялки; 4 – кронштейн; 5 – пружина; 6 – гайка регулировки преднатяга пружины; 7 – хомут крепления семяпровода; 8 – семянаправитель

Дисковая сеялка «Авангард» (рисунок 5) предназначена для посева семян зерновых и зернобобовых культур по минимальной и нулевой технологиям. Сеялка имеет компоновку, близкую к сеялкам СКП-2,1, однако сильно отличается конструктивными решениями: имеет бункер увеличенного объема, в конструкции высевających аппаратов имеется вариатор для бесступенчатого регулирования частоты вращения катушек; сеялка установлена на колесном ходу, ее перевод из рабочего в транспортное положение посредством гидроцилиндра. Сеялка механическая, но в своей конструкции имеет вентиляторную установку для создания воздушного потока в семяпроводах [4].



Рисунок 5. Зерновая сеялка «Авангард»

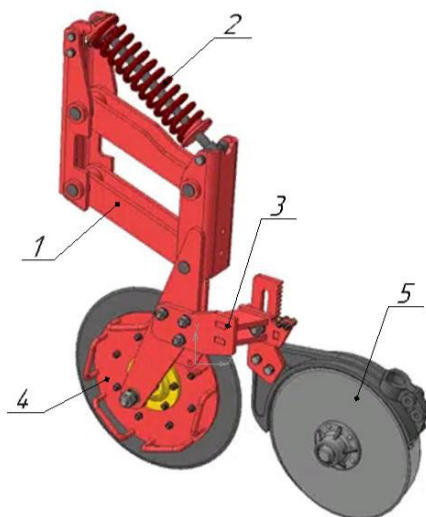


Рисунок 6. Двухдисковый сошник сеялки «Авангард»:
1 – навеска параллелограммная; 2 – пружина сжатия; 3 – корпус;
4 – нож дисковый; 5 – сошник двухдисковый

Механическая сеялка John Deere 1590 (рисунок 7) предназначена для посева семян зерновых и зернобобовых культур по минимальной и нулевой технологиям [5]. Рабочим органом механической сеялки John Deere 1590 являются однодисковые сошники серии 90, предназначенные для работы в условиях повышенного содержания пожнивных остатков. Диск диаметром 460 мм установлен под углом 7° к направлению движения. Прижимное усилие до 180 кг на каждый сошник создается гидравлической системой нагружения сеялки за счет ее массы, что обеспечивает равномерное заглубление даже на твердых почвах.



Рисунок 7. Механическая зерновая сеялка John Deere 1590

Сошник (рисунок 8) включает рычаг 1, нагруженный пружиной сжатия 2. На рычаге установлен диск 3. Для копирования рельефа и стабилизации хода сошника служит опорное колесо 4. Дополнительными элементами сошника являются прижимная пластина 5, прикатывающее колесо 6 и заваливающее колесо 7. Механизм 8 обеспечивает регулировку глубины

заглубления диска, а механизм 9 – настройку усилия прикатывания. Семена поступают через трубчатый семяпровод 10 [5].

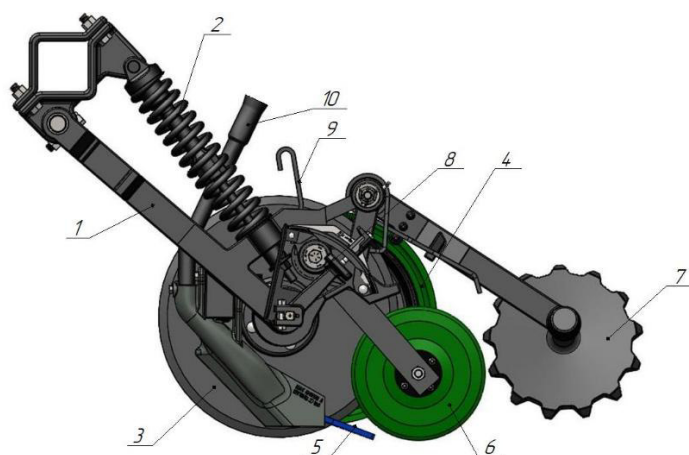


Рисунок 8. Однодисковый сошник серии 90 сеялки John Deere 1590:

- 1 – рычаг; 2 – пружина; 3 – диск; 4 – колесо опорное; 5 – пластина прижимная; 6 – колесо прикатывающее; 7 – колесо заваливающее; 8 – механизм регулировки заглубления; 9 – механизм регулировки усилия прикатывания; 10 – семяпровод

На основании проведенного обзора современных стерневых зерновых сеялок и анализа конструкций их сошников нами сделан вывод, что в качестве рабочих органов у стерневых сеялок используются лаповые, долотовидные, двухдисковые и однодисковые сошники. Каждый из них имеет свои особенности, а также преимущества и недостатки [6].

Лаповые сошники эффективны при работе по стерне и подрезании сорняков, но склонны к сгуживанию почвы и выносу ее влажного слоя на поверхность. Долотовидные сошники также хорошо работают по стерне, при этом обеспечивая сохранение влаги, однако им присущи сгуживание перед стойкой и значительная неравномерность глубины высева. Двухдисковые сошники отличаются низким тяговым сопротивлением и пригодны для узких междурядий, но требуют качественной подготовки поля. Однодисковые сошники обеспечивают стабильную глубину, индивидуальное копирование рельефа и могут работать на высоких скоростях, однако их конструкция значительно сложнее остальных сошников.

Список использованных источников

1. Обзор стерневых сеялок с механическими высевными устройствами / С.Г. Лопарева, Ю.Н. Мекшун, Д.В. Лопарев, О.Н. Зуева // Достижения и перспективы научно-инновационного развития АПК: материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции с международным участием, Курган, 27 февраля 2020 года / Курган: Курганская ГСХА им. Т.С. Мальцева, 2020. – С. 364-369.

2. Сеялка – культиватор зернотуковая для полосного посева СКП – 2,1 (базовая модель) и её модификации. Руководство по эксплуатации СКП -2,1 00.00.000 РЭ / ООО «Ом-Сельмаш», г. Омск, 2016 г. – 86 с.

3. Зерновая сеялка СКП-2,1Д [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://diboragro.ru/archives/tehnika/seyalka-skp-2-1d?ysclid=mpa80xtsyl54542832>
4. Зерновая сеялка «Авангард» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.сеялкапро.рф/seyalka-avangard>
5. Механическая зерновая сеялка John Deere 1590 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://penza.technodom.com/product/zernovaya-seyalka-1590/>
6. Джалалов, Ж. С. Обзор конструкций сошников стерневых сеялок для посева зерновых культур / Ж. С. Джалалов // Наука и молодежь: новые идеи и решения : Материалы XIII Международной научно-практической конференции молодых исследователей, Волгоград, 20–22 марта 2019 года. Том Часть I. – Волгоград: Волгоградский ГАУ, 2019. – С. 291-292.

A BRIEF REVIEW OF STUBBLE DRILLS AND THEIR COULTERS

N.S. Mineev¹, P.N. Khorev¹, M.A. Terekhin²

¹*Penza State Agricultural University, Penza, Russia*

²*JSC Radiozavod, Penza, Russia*

The article provides an overview of modern stubble grain drills and an analysis of their coulters designs. The seeder-cultivator SKP-2.1 with a shovel coulters, its modification SKP-2.1D with a chisel coulters, the Avangard disc drill with a double-disc coulters, and the John Deere 1590 mechanical drill with a single-disc coulters are considered. The design features of each coulters type, their advantages and disadvantages when operating on stubble backgrounds under minimum and no-till conditions are identified.

Keywords: stubble drill, shovel coulters, chisel coulters, double-disc coulters, single-disc coulters, minimum tillage, no-till, packing.

УДК 629.7

ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ЭКИПАЖА

А.О. Мохов

*Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева–КАИ, г. Казань, Россия*

Внедрение искусственного интеллекта, на сегодняшний день, изучается чуть ли не во всех сферах деятельности человека. Авиация тоже не стала исключением – внедрение искусственного интеллекта, интеллектуальных систем поддержки, машинное зрение открывают новые горизонты в совершенствовании авиации, повышения безопасности перелетов и упрощения работы для обслуживающего персонала самолета. Эта статья была посвящена перспективе применения интеллектуальной системы поддержки экипажа – повышение безопасности авиаперелетов, разгрузка обслуживающего персонала, прогнозирование полета и другие преимущества, описываемые ниже.

Ключевые слова: системы, помощник, безопасность, обучение, остекление, БРЭО, техника, пилот, полет, кабина.

Современный этап развития авиастроения характеризуется переходом к шестому поколению воздушных судов, для которых характерна высокая степень интеллектуализации бортового оборудования. Если ранее автоматизация ограничивалась выполнением заранее заданных алгоритмов (например, автопилот и система автоматического управления тягой), то в настоящее время акцент смещается на разработку систем, способных комплексно анализировать ситуацию и предлагать экипажу оптимальные решения в условиях ограниченного времени и неполной информации [3].

Актуальность данного направления подтверждается активными исследованиями, проводимыми Федеральным агентством «ГосНИИАС» в рамках комплексных научно-технологических проектов Научно-исследовательского центра «Институт имени Н.Е. Жуковского» [1]. Целью данной работы является систематизация подходов к разработке интеллектуальных систем поддержки экипажа и оценка перспектив их внедрения в практику гражданского и военного самолетостроения.

Традиционные бортовые радиоэлектронные устройства (БРЭО) выполняют функцию сбора и отображения информации, при этом решение всегда остается за человеком. Однако в стрессовых ситуациях (например, отказ двигателя, сложные метеоусловия, ухудшение состояния члена экипажа) когнитивные способности пилота могут снижаться. В связи с этим разрабатывается концепция «помощника пилота» (далее – Помощник).

Помощник представляет собой интеллектуальную надстройку над стандартными системами. Его функции включают в себя:

- интеграцию данных от всех датчиков (радиолокация, системы спутниковой навигации, системы предупреждения столкновений);
- формирование единой картины, текущей и прогнозируемой воздушной обстановки;
- выявление потенциально опасных сценариев развития событий;
- предоставление экипажу не просто сигнала тревоги, а четкого алгоритма действий для предотвращения негативных последствий.

Исследования показывают, что внедрение таких систем позволяет существенно снизить вероятность перехода особой ситуации в аварийную за счет сокращения времени реакции экипажа [4].

Ключевыми технологиями для реализации Помощника являются системы технического зрения и алгоритмы машинного обучения. Системы технического зрения, основанные на оптических и инфракрасных сенсорах, позволяют формировать изображение внешнего пространства даже в условиях плохой видимости. В апреле 2025 года специалисты ГосНИИАС и СибНИА провели летные экспериментальные исследования, подтвердившие принципиальную возможность пилотирования в кабине без остекления, где единственным источником информации является интеллектуальная система внешнего видения [1]. Это радикальное решение может в будущем изменить облик самолета, устранив ограничения по аэродинамике и массе, связанные с наличием фонаря кабины.

Вторым ключевым элементом являются алгоритмы прогнозирования. Современные исследования в области моделирования динамики полета обеспечивают высокую точность предсказания траектории движения самолета на этапе посадки. Разрабатываемые алгоритмы нелинейного программирования позволяют оценивать точку приземления и длину пробега по взлетно-посадочной полосе (ВПП), принимая во внимание текущую скорость, направление и силу ветра, состояние покрытия и массу самолета [2]. В таблице 1 представлена обобщенная схема функционирования интеллектуальной системы предупреждения о выкатывании.

Таблица 1 – Алгоритм работы системы предотвращения выкатывания

Этап	Входные данные	Обработка	Результат
1. Сбор данных	Скорость, ветер, масса, состояние ВПП, глиссада	Фильтрация и верификация сигналов	Массив данных о текущем состоянии
2. Прогноз	Текущая траектория, параметры торможения	Нейросетевая модель / алгоритмы нелинейного программирования	Прогноз точки остановки
3. Оценка риска	Прогноз точки остановки, длина ВПП	Сравнение с пороговыми значениями	Индекс опасности выкатывания
4. Выдача рекомендаций	Индекс опасности	Формирование сообщения экипажу	«Увеличьте торможение», «Уход на второй круг»

Критически важным аспектом является надежность интеллектуальных систем. Ошибки, возникающие в нейросетях, могут иметь серьезные последствия, поэтому валидация технических решений осуществляется с использованием лабораторных и летных демонстраторов технологий. Летный демонстратор предоставляет возможность проверки функционирования систем в реальных условиях, под воздействием различных возмущающих факторов.

Постепенное внедрение помощников будет осуществляться в три этапа:

1. Информационный этап: система анализирует ситуацию и информирует пилота о возможных рисках и рекомендуемых действиях, при этом принятие решений и управление полностью остаются за человеком.

2. Рекомендательный этап: система активно предлагает готовые алгоритмы действий (например, отображает на дисплее: «Выполнить уход на второй круг»).

3. Советующий этап с контролем: система может взять на себя управление в критической ситуации (например, при необходимости парирования сваливания), однако экипаж имеет возможность отключить автоматизацию и перейти в ручной режим.

Интеллектуализация бортового оборудования представляет собой ключевое направление развития как мировой, так и отечественной авиации. Создание «помощников пилота» на основе технологий компьютерного зрения и методов прогнозного моделирования позволит повысить уровень безопасности полетов до качественно нового стандарта. Разраба-

тываемые в России технологии, подтвержденные экспериментальными исследованиями, создают основу для формирования конкурентоспособных воздушных судов следующего поколения с новыми эргономическими и пилотажными характеристиками.

Список использованных источников

1. Инновации ГосНИИАС в эфире «России-1» // Ассоциация государственных научных центров «НАУКА»: [веб-сайт]. 24.09.2025. URL: <https://agnc.ru/news/17478> (дата обращения: 10.03.2026).
2. Ученые ГосНИИАС представили результаты исследований в области моделирования динамики полета // ГосНИИАС: [веб-сайт]. 20.06.2025. URL: <https://gosniias.ru/news-200625.html> (дата обращения: 10.03.2026).
3. Евдокимов В.Г. Интеллектуальные системы управления воздушным движением: современное состояние и перспективы // Авиационная промышленность. – 2024. – № 3. – С. 22–29.
4. Смирнов А.Б., Ковалева Е.П. Человеческий фактор в авиации: когнитивные аспекты взаимодействия с автоматизированными системами // Проблемы безопасности полетов. – 2025. – № 1. – С. 45–52.

PROSPECTS FOR THE IMPLEMENTATION OF INTELLIGENT CREW SUPPORT SYSTEMS

A.O. Mokhov

*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI,
Kazan, Russia*

The implementation of artificial intelligence is currently being studied in nearly all areas of human activity. Aviation is no exception – the implementation of artificial intelligence, intelligent support systems, and machine vision are opening up new horizons in improving aviation, enhancing flight safety, and simplifying the work of aircraft maintenance personnel. This article focused on the prospects for the implementation of an intelligent crew support system – improving flight safety, reducing the workload of maintenance personnel, flight prediction, and other benefits described below.

Keywords: *systems, assistant, safety, training, glazing, avionics, technology, pilot, flight, cockpit.*

УДК 629.7

РАЗНООБРАЗИЕ КОНСТРУКЦИЙ КРЫЛЬЕВ В АВИАЦИИ

А.О. Мохов

*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева –
КАИ, г. Казань, Россия*

Конструкция авиационного крыла обладает весьма богатой историей. В различные временные промежутки использовались разные виды крыльев, возлагались разные задачи и разные стандарты качества. Данная статья посвящена

рассмотрению разнообразия конструкций авиационных крыльев, где именно они применяются и актуальны ли они по сей день.

Ключевые слова: конструкция, характеристики, сравнение, крыло, форма, применение.

Крыло представляет собой ключевой элемент самолета, так как именно оно обеспечивает генерацию подъемной силы, необходимой для осуществления полета. Геометрические и конструктивные параметры в значительной степени определяют аэродинамические характеристики летательного аппарата, включая уровень сопротивления, устойчивость, маневренность и экономичность. В связи с этим, при анализе различных типов крыльев особое внимание уделяется их форме в плане и общей геометрии, поскольку именно эти характеристики существенно влияют на распределение подъемной силы и эффективность полета в различных режимах скорости. В авиационной практике выделяются несколько основных моделей крыльев, каждая из которых предназначена для решения определенных эксплуатационных задач. В многочисленных методических и научных источниках выделяются три основных класса форм крыльев в плане: прямые, стреловидные и треугольные. Основными характеристиками, рассматриваемыми при анализе крыла самолета в плане, являются его удлинение, стреловидность и изменение хорды.

Данные о влиянии удлинения крыла на индуктивное сопротивление, а также о взаимосвязи формы крыла с соотношением подъемной силы и сопротивления подробно рассматриваются в материалах NASA и FAA. В частности, NASA указывает на то, что индуктивное сопротивление обратно пропорционально удлинению крыла, и более вытянутое крыло способствует снижению потерь, связанных с образованием концевых вихрей. FAA также подчеркивает, что форма крыла непосредственно влияет на величины подъемной силы и сопротивления. Рассмотрим классификацию более подробно.

Прямое крыло является одной из наиболее простых и распространенных схем, особенно для самолетов, предназначенных для дозвуковых скоростей. В плане оно представляет собой трапецию или прямоугольник с минимальным сужением. Его преимуществом считается высокая эффективность на малых и средних скоростях, хорошая подъемная способность и сравнительно низкая посадочная скорость. Благодаря обычно большему удлинению, такое крыло способствует снижению индуктивного сопротивления. Однако при приближении к околозвуковым режимам прямое крыло уступает стреловидным схемам, поскольку рост волнового сопротивления становится более выраженным. Поэтому прямая конструкция крыла остается прерогативой легкомоторной авиации, спортивных самолетов, беспилотных аппаратов, для которых первостепенное значение имеют простота пилотирования и экономичность на дозвуковых скоростях.

Стреловидное крыло представляет собой более универсальную конструкцию, которая находит преимущественное применение на самолетах,

работающих в трансзвуковом и высокоскоростном дозвуковом диапазонах. Основное преимущество данной схемы заключается в её способности лучше адаптироваться к скоростям, близким к скорости звука. Благодаря стреловидной форме снижается нормальная составляющая скорости потока к передней кромке, что позволяет отсрочить резкий рост волнового сопротивления. Однако такая конструкция, как правило, характеризуется меньшей подъёмной эффективностью на низких скоростях по сравнению с прямым крылом и требует более сложной механизации для улучшения взлётно-посадочных характеристик. Кроме того, увеличение стреловидности полезно для высоких скоростей, но сопряжено с определёнными потерями подъёмной характеристики на малых числах Маха [2, 4].

Треугольное, или дельтовидное, крыло отличается значительной площадью корневой части, высокой стреловидностью передней кромки и хорошей адаптацией к полётам на больших скоростях. Эта конструкция особенно эффективна в сверхзвуковой авиации, поскольку обеспечивает прочность конструкции и приемлемые аэродинамические характеристики. Кроме того, для дельтовидного крыла характерно образование вихревой подъёмной силы на больших углах атаки, что может улучшать управляемость в определённых режимах. Тем не менее, треугольное крыло имеет пониженное лобовое сопротивление и невысокую несущую способность. На малых скоростях такие конструкции, как правило, уступают прямым схемам по экономичности и требуют более высоких взлётно-посадочных скоростей. NASA и MIT рассматривают дельта-крыло как рациональное решение, прежде всего, для высокоскоростных и сверхзвуковых режимов [2].

Рассмотренные выше конструкции представляют собой наиболее простые решения, однако в поиске более оптимальных аэродинамических характеристик также разработаны более нетипичные формы, такие как эллиптические и суперкритические крылья.

Эллиптическое крыло традиционно рассматривается как аэродинамически эффективная схема, поскольку эллиптическое распределение подъёмной силы по размаху близко к оптимальному с точки зрения минимизации индуктивного сопротивления. Поэтому такая форма долгое время считалась одной из наиболее эффективных с аэродинамической точки зрения. Однако её практическое применение ограничивается конструктивной и производственной сложностью. В современной авиации полностью эллиптические крылья используются редко, но сама идея приближения к оптимальному распределению нагрузки сохраняется в процессе проектирования [1].

Отдельное внимание следует уделить суперкритическому крылу, которое характеризуется не столько геометрией в плане, сколько современными аэродинамическими характеристиками профиля. Основная цель данного крыла заключается в снижении волнового сопротивления в трансзвуковых режимах и повышении топливной эффективности магистральных самолётов. Такие профили способствуют замедлению формиро-

вания сильных скачков уплотнения на верхней поверхности крыла, что, в свою очередь, улучшает летные характеристики самолёта в крейсерских режимах. В материалах Массачусетского технологического института суперкритический профиль рассматривается как важное решение для современных транспортных самолётов, работающих вблизи трансзвуковых скоростей. Эта технология активно применяется в таких распространённых моделях, как MC-21 и Boeing 777.

Одним из прорывных направлений стало стремление обеспечить максимальную эффективность на различных стадиях полета, что привело к разработке концепции крыла с изменяемой стреловидностью. При малой стреловидности улучшаются взлётно-посадочные характеристики и показатели на низких скоростях, тогда как при высокой стреловидности повышается эффективность полёта на больших скоростях. Данный подход был реализован в ряде военных самолётов, где требовалось сочетание короткого взлёта, высокой крейсерской скорости и устойчивости в различных режимах. Однако такая конструкция значительно усложняет самолёт, увеличивает его массу и требования к техническому обслуживанию. Примером успешной реализации данной технологии является самолёт F-111.

Каждая из вышеописанных моделей обеспечивает определённое сочетание подъёмной силы, сопротивления, устойчивости и эффективности в конкретном диапазоне скоростей. Приведём данные в сравнительной таблице.

Таблица 1 – Основные различия между рассмотренными моделями крыльев

Модель крыла	Эффективный диапазон скоростей	Подъёмная сила на малых скоростях	Сопротивление на высоких скоростях	Взлётно-посадочные характеристики	Конструктивная сложность
Прямое	малые и средние дозвуковые	высокая	повышенное при приближении к трансзвуку	хорошие	низкая
Стреловидное	околозвуковые и трансзвуковые	средняя	ниже, чем у прямого на больших скоростях	хуже без развитой механизации	средняя
Дельтавидное	высокие дозвуковые и сверхзвуковые	сравнительно низкая	эффективное на больших скоростях	ограниченные	средняя или высокая
Изменяемой стреловидности	широкий диапазон	высокая при малой стреловидности	низкое при большой стреловидности	хорошие в адаптивном режиме	очень высокая

Эллиптическое	преимущественно дозвуковые	высокая	зависит от режима, выгодно по индуктивному сопротивлению	хорошие	высокая
Суперкритическое	трансзвуковые	средняя	пониженное волновое сопротивление	зависят от общей схемы	средняя

Из изложенного следует, что выбор модели крыла в авиационном проектировании всегда сопряжён с необходимостью достижения баланса между аэродинамической эффективностью, технологическими аспектами и назначением летательного аппарата. Современный подход к проектированию крыла основывается на комплексной оптимизации, при которой форма и конструкция крыла определяются с учётом диапазона скоростей, функционального назначения самолёта, требований к экономичности и особенностей эксплуатации.

Особое внимание следует уделить развитию попыток обеспечения максимальных характеристик путём модификации различных форм крыльев, что на сегодняшний день представляет собой активное направление в авиастроении. Одним из наиболее перспективных направлений являются морфирующие (адаптивные) крылья, способные изменять свою форму в процессе полёта. Например, проекты NASA используют композитные структуры, которые позволяют крылу изгибаться и вращаться, адаптируясь к текущим условиям, что способствует снижению сопротивления и повышению эффективности.

Кроме того, проводятся исследования в области бионических и гибких крыльев, вдохновлённых полётом птиц. Такие конструкции применяют деформируемые поверхности и интеллектуальные материалы, что позволяет им адаптироваться к турбулентности и повышать энергоэффективность полёта.

Таким образом, конструкции крыльев будут и впредь ориентированы на достижение максимальной аэродинамической и эксплуатационной эффективности, что может привести к появлению новых модификаций, удовлетворяющих различные потребности в авиастроении.

Список использованных источников

1. Корнеев В.М., Конструкция и основы эксплуатации летательных аппаратов : конспект лекций / В.М. Корнеев. – Ульяновск УБАУ ГА(и), 2009. – 130 с.
2. Крыло самолёта. Статья Рувики. URL: [https://ru.ruwiki.ru/wiki/ Крыло_самолёта](https://ru.ruwiki.ru/wiki/Крыло_самолёта) (дата обращения 17.03.2026).
3. NASA Technical Reports Server (NTRS) – архив технических публикаций NASA URL: <https://ntrs.nasa.gov/> (дата обращения 17.03.2026).
4. FAA – Pilot’s Handbook of Aeronautical Knowledge / Glider Flying Handbook. URL: https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/07_phak_ch5_0.pdf (дата обращения 17.03.2026).

5. MIT OpenCourseWare – Aircraft Systems Engineering (учебные материалы по аэродинамике). URL: <https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2004/> (дата обращения 17.03.2026).

THE VARIETY OF WING DESIGN IN AVIATION

A.O. Mokhov

*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI,
Kazan, Russia*

Aircraft wing design has a rich history. At different times, different types of wings have been used, with different missions and quality standards. This article examines the diversity of aircraft wing designs, their applications, and their relevance today.

Keywords: design, characteristics, comparison, wing, shape, application.

УДК 629.7

СПОСОБЫ УСКОРЕННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КРЫЛЬЕВ ДЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ САМОЛЕТОВ

А.О. Мохов

*Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ,
г. Казань, Россия*

Унификация, безусловно, во многих случаях является чрезвычайно полезной, но в некоторых случаях не оказывает положительный эффект. Одним из таких случаев является проектировка крыла грузового самолета. Грузовые самолеты разрабатываются для разных задач и применяются они при разных условиях, тем самым, унифицированная конструкция крыла, в данном случае, оказывает лишь негативный эффект, увеличивая траты на разработку в тех случаях, когда их можно было избежать. Здесь представлено такое решение, как составная конструкция крыла. Такая конструкция способна усовершенствовать грузовой самолет, снизив его себестоимость, а также не потерять существенно в качестве. Подробнее эта тематика будет рассмотрена и представлена в данной статье.

Ключевые слова: крыло, унификация, качество, проектирование, самолет, аэродинамика, компоновка.

В условиях современной экономической ситуации перед производителями авиакосмической техники стоит задача не только разработки нового самолета с высокими летно-техническими характеристиками, но и достижения этой цели с минимальными затратами времени и ресурсов. Одним из эффективных подходов к решению данной задачи является создание не отдельного воздушного судна, а целого семейства самолетов на базе унифицированной платформы [3]. При разработке модификаций с увеличен-

ной грузоподъемностью или дальностью полета возникает необходимость в увеличении площади крыла. Логичным шагом в этом контексте является проектирование нового крыла с большей площадью, при этом максимально используя существующие конструктивные и технологические решения базовой модели. Однако ключевым вопросом остается то, насколько ухудшатся аэродинамические характеристики такого «гибридного» крыла по сравнению с крылом, спроектированным с нуля. Данная работа посвящена поиску ответа на этот вопрос [1].

Традиционный подход к созданию нового самолета с увеличенной взлетной массой предполагает полное перепроектирование крыла, что требует проведения полного цикла расчетных и экспериментальных работ, а также изготовления новой оснастки, что, в свою очередь, приводит к увеличению стоимости и сроков разработки.

Альтернативный подход, исследуемый в Центральном аэрогидродинамическом институте (ЦАГИ), предлагает технологию проектирования «составного» крыла. Суть данного метода заключается в формировании крыла большей площади путем добавления дополнительных секций (вставок) к базовой конструкции. Например, к корневой части крыла базового самолета может быть добавлена центропланная вставка, при этом консоли могут либо удлиняться, либо оставаться прежними, но устанавливаться с некоторым смещением [1].

В рамках научно-исследовательской работы «Разработка концепций для создания магистральных и региональных самолетов следующего поколения» специалисты ЦАГИ исследовали две компоновки: тяжелого коммерческого (транспортного) самолета и его модификации с увеличенной грузоподъемностью, что потребовало увеличения площади крыла.

Для оценки эффективности предложенной концепции была проведена серия испытаний тематических моделей в аэродинамической трубе Т-106 (ЦАГИ), предназначенной для исследований в области взлетно-посадочных режимов и дозвуковой аэродинамики. В качестве объекта исследования была выбрана модель крыла. Испытаниям подверглись два варианта компоновки:

- Вариант А (базовый): крыло, спроектированное «с нуля» для самолета с увеличенной грузоподъемностью (эталон);
- Вариант Б (составной): крыло, собранное из элементов базового крыла с использованием масштабирующих вставок.

В ходе эксперимента были измерены аэродинамические силы и моменты при различных углах атаки и скоростях потока (числах Маха), соответствующих крейсерскому полету. Основным критерием эффективности крыла в крейсерском режиме является максимальное аэродинамическое качество ($K_{\max}$), которое показывает, сколько километров может пролететь самолет, теряя один километр высоты в планирующем полете, а также эффективность преобразования тяги двигателей в подъемную силу.

Результаты испытаний представлены в Таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительные аэродинамические характеристики

Параметр	Вариант А (проект «с нуля»)	Вариант Б (составное крыло)	Отклонение
Аэродинамическое качество, $K_{\max}$ (отн. ед.)	1,000	0,985	-1,5%
Несущие свойства ($C_y \max$)	1,000	0,992	-0,8%
Характеристики устойчивости	Эталон	В пределах нормы	–

Как свидетельствуют представленные данные, составное крыло демонстрирует результаты, которые всего на 1,5% ниже по сравнению с эталонным вариантом. Данное незначительное снижение объясняется тем, что основное негативное воздействие на аэродинамические характеристики оказывают места стыков различных компонентов крыла. Тем не менее, благодаря оптимизации геометрии переходных зон и применению современных методов компьютерного моделирования при разработке вставок, удалось минимизировать эти потери.

Экспериментальные испытания также подтвердили, что скоростные характеристики и запас устойчивости составного крыла находятся в пределах допустимых значений, что делает его пригодным для практического применения. Хотя снижение аэродинамического качества на 1,5% может привести к некоторому увеличению расхода топлива, это компенсируется экономией в стоимости и сроках разработки. При создании семейства самолетов по традиционной схеме затраты на проектирование и испытания нового крыла могут достигать 30-40% от общей стоимости программы. Применение технологии составного крыла позволяет:

- сохранить существующую производственную оснастку для базовых элементов;
- сократить объем сертификационных испытаний, поскольку часть конструкции уже сертифицирована;
- ускорить вывод на рынок новой модификации на 2-3 года.

Проведенные исследования в ЦАГИ подтвердили эффективность концепции составного крыла для разработки семейств самолетов различной грузоподъемности. Незначительное снижение аэродинамического качества (на уровне 1,5%) является приемлемым компромиссом за значительное сокращение временных и финансовых затрат на разработку. Предложенная технология может быть рекомендована для внедрения при проектировании перспективных транспортных и магистральных воздушных судов, что позволит авиастроительным компаниям гибко и оперативно реагировать на требования рынка.

Список использованных источников

1. Ученые ЦАГИ исследуют концепции создания самолетов различной грузоподъемности // ЦАГИ: [веб-сайт]. 14.04.2022. URL: <http://www.tsagi.ru/pressroom/archive/2022/5651/> (дата обращения: 10.03.2026);
2. Чернышев И.А. Аэродинамическое проектирование дозвуковых транспортных самолетов // Труды ЦАГИ. – 2024. – Вып. 2789. – С. 98–112;

3. Шаталов И.К., Морозов В.В. Унификация в авиастроении: методы создания параметрических рядов и семейств самолетов // Научный вестник ЦАГИ. – 2023. – Т. 54. № 2. – С. 15–25;

4. Акопов Р.Г., Селезнев В.П. Проектирование самолетов. – М.: Машиностроение, 2022. – 640 с.

METHODS FOR ACCELERATED DESIGN OF WINGS FOR TRANSPORT AIRCRAFT

A.O. Mokhov

*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev–KAI,
Kazan, Russia*

Unification is undoubtedly extremely beneficial in many cases, but in others, it has no positive effect. One such case is the design of a cargo aircraft wing. Cargo aircraft are developed for different missions and are used under different conditions, so a unified wing design, in this case, has only a negative effect, increasing development costs where they could have been avoided. A solution such as a composite wing design is presented here. This design can improve cargo aircraft, reducing its cost without significantly compromising quality. This topic will be discussed and presented in more detail in this article.

Keywords: wing, unification, quality, design, aircraft, aerodynamics, layout.

УДК 621.311.621.644

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА НОРМ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА НЕФТИ С УЧЕТОМ РЕЖИМНЫХ И МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

М.Э. Музафаров, Л.А. Рябишина

*Уфимский государственный нефтяной технический университет,
г. Уфа, Россия*

В статье рассмотрена актуальная проблема достоверного нормирования электропотребления на нефтеперекачивающих станциях (НПС). Проанализированы недостатки традиционных методов нормирования, основанных на удельных расходах. Предложена усовершенствованная методика расчета индивидуальных норм электропотребления, учитывающая фактические напорно-расходные характеристики насосных агрегатов и режимы их работы. Обоснована необходимость метрологической коррекции результатов измерений в условиях малых нагрузок и несинусоидальности тока. Приведены результаты апробации методики на действующей НПС, подтверждающие снижение погрешности нормирования до 4–6%.

Ключевые слова: трубопроводный транспорт, нефтеперекачивающая станция, нормы электропотребления, центробежный насос, энергоэффективность, режимы работы, учет электроэнергии.

Трубопроводный транспорт нефти является одним из наиболее энергоемких секторов топливно-энергетического комплекса России. Доля электроэнергии в себестоимости перекачки 1 тонны нефти достигает 35-40%, а на некоторых участках – до 50%. В этих условиях нормирование электропотребления становится ключевым инструментом энергоменеджмента: оно позволяет не только планировать затраты, но и выявлять сверхнормативные потери, оценивать техническое состояние оборудования и обосновывать инвестиции в энергосбережение.

Однако существующие методики нормирования (преимущественно статистические) обладают низкой точностью при изменении режимов перекачки, не учитывают индивидуальные характеристики насосов и, что особенно важно, игнорируют метрологические погрешности систем учета. Это приводит к парадоксу: чем точнее мы хотим измерить экономию, тем строже должны нормировать потребление, но без учета погрешности самих измерений нормы становятся «плавающими».

Цель настоящей работы является разработка и обоснование методики расчета технически обоснованных норм потребления электроэнергии для нефтеперекачивающих станций, учитывающей:

- напорно-расходные характеристики насосных агрегатов;
- режимные факторы (подача, частота вращения, состав включенного оборудования);
- метрологическую составляющую (погрешность измерительных каналов в рабочих зонах).

Для центробежного насоса (магистрального или подпорного), составляющего основу НПС, потребляемая электрическая мощность определяется выражением:

$$P_{эл} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta_{нас}(Q) \cdot \eta_{дв}(P) \cdot \eta_{чрп}}, \quad (1)$$

где $P_{эл}$ – мощность, потребляемая из сети, кВт;

ρ – плотность нефти, кг/м³ (зависит от температуры и состава);

$g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения;

Q – объемная подача (расход), м³/с;

H – напор, развиваемый насосом, м;

$\eta_{нас}(Q)$ – КПД насоса, зависящий от подачи (характеристика приводится в паспорте или получается при стендовых испытаниях);

$\eta_{дв}$ – КПД электродвигателя (для синхронных двигателей НПС – 0,95...0,97);

$\eta_{чрп}$ – КПД преобразователя частоты (при его наличии).

Зависимость $\eta_{нас}(Q)$ имеет колоколообразную форму: снижение КПД как при малых, так и при сверхноминальных подачах. Именно это делает необходимым режимное нормирование: один и тот же насос в разных точ-

ках характеристики потребляет разную мощность для перекачки одного и того же объема.

При построении напорно-расходной характеристики нужно учитывать, что для центробежных насосов НПС (типа НМ, НМП, НПВ) характеристика $H(Q)$ с высокой точностью аппроксимируется полиномом второй степени (параболой):

$$H(Q) = a - b \cdot Q^2 \quad (2)$$

Коэффициенты a (напор при закрытой задвижке, $Q=0$) и b определяются:
– по паспортным данным (с поправочными коэффициентами на вязкость и износ);

– либо по результатам натурных замеров Q_i, H_i с последующей аппроксимацией методом наименьших квадратов.

Ни одна норма не будет иметь смысла, если система учета не способна подтвердить ее выполнение с приемлемой погрешностью. В ходе исследований на четырех НПС (диапазон мощностей 1,6–12,5 МВт) было установлено:

В зоне малых нагрузок (ток менее 10% $I_{ном}$ трансформатора тока) погрешность измерения активной мощности может достигать 5–6%, что делает сравнение с расчетной нормой (например, $\pm 3\%$) некорректным.

Наличие преобразователей частоты вносит высшие гармоники – до 40% при глубоком регулировании, что увеличивает дополнительную погрешность индукционных (и даже некоторых электронных) счетчиков на 1,5–2,5%.

Отсюда следует необходимость введения поправочных коэффициентов в расчетную норму:

$$N_{СК} = N_{расч} \cdot k_{нагр} \cdot k_{гarm} \quad (3)$$

где: $N_{расч}$ – расчётная потребляемая мощность, рассчитывается по формуле 1;

$k_{нагр}$ – коэффициент, учитывающий увеличение погрешности учета при малых нагрузках (определяется по паспорту трансформаторов тока);

$k_{гarm}$ – поправочный коэффициент на несинусоидальность (характеризует дополнительную погрешность конкретного счетчика при известном спектре гармоник тока).

Приведём пример расчёта относительной погрешности измерений.

Исходные данные:

– перекачиваемая среда: нефть плотностью 0,865 г/см³, кинематическая вязкость 22 сСт;

– режим работы: $Q = 1850$ м³/ч, $H = 210$ м, один насос в работе, частота 50 Гц (без ЧРП);

– учет электроэнергии: счетчик СЭТ-4ТМ.03М (класс 0,5S), ТТ – ТОЛ-10 (класс 0,5, $I_{ном} = 300$ А, фактический ток – 185 А, т.е. 62% от номинала – «хорошая» зона).

Расчет нормы по формуле (1):

$$P_{эл} = \frac{865 \cdot 9,81 \cdot (1850 / 3600) \cdot 210}{0,78 \cdot 0,96} = 1847 \text{ кВт},$$

где $\eta_{нас}$ (по паспорту при $Q=1850$) = 0,78;

$\eta_{дв}$ = 0,96 (по паспорту двигателя).

Измеренное значение (по АСКУЭ): $P_{изм}$ = 1865 кВт.

Относительное расхождение = $\frac{1865 - 1847}{1847} \cdot 100\% = 0,97\%$.

Погрешность находится в пределах класса точности коммерческого учета ($\pm 1,5$ – $2,0\%$ для активной энергии), что подтверждает пригодность методики для оперативного нормирования. Для режимов с нагрузкой менее 30% Ином аналогичное расхождение достигало 5–8%, что потребовало введения поправочного коэффициента $k_{нагр}$ 0,94.

Традиционные методы нормирования (статистический, укрупненный) обладают низкой достоверностью для объектов трубопроводного транспорта из-за переменных режимов перекачки и широкого диапазона нагрузок насосных агрегатов.

Предложенная режимно-технологическая методика, основанная на напорно-расходных характеристиках насосов, обеспечивает погрешность расчета норм на уровне 1–3% в зоне номинальных нагрузок и 4–6% при учете метрологической коррекции.

Обязательным этапом является оценка неопределенности измерений в узлах учета: если она превышает 5% для контролируемого параметра, результаты нормирования следует интерпретировать как «неопределенные», а не как «сверхнормативные».

Список использованных источников

1. РД 153-39.4-091-01. Правила технической эксплуатации магистральных нефтепроводов. – Введ. 2002-01-01. – М.: Транснефть, 2001. – 260 с.
2. ГОСТ Р 8.655-2009. Государственная система обеспечения единства измерений. – М.: Стандартинформ, 2011.
3. Лебедев В.В., Шумилин В.К. Энергосбережение на нефтеперекачивающих станциях. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2017. – 184 с.
4. IEEE 1459-2010. Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions.

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR CALCULATING ELECTRICITY CONSUMPTION RATES FOR OIL PIPELINE TRANSPORT, TAKING INTO ACCOUNT REGIME AND METROLOGICAL FACTORS

M.E. Muzafarov, L.A. Ryabishina

*Ufa State Petroleum Technological University,
Ufa, Russia*

The article discusses the current problem of reliable regulation of electricity consumption at oil pumping stations (OPS). The disadvantages of traditional methods of rationing based on specific consumption rates have been analyzed. An improved method for calculating individual electricity consumption rates has been proposed, taking into account the actual pressure and flow characteristics of the pump units and their operating modes. The need for metrological correction of measurement results under conditions of low loads and non-sinusoidal current has been substantiated. The results of the methodology's testing at an existing pumping station have been presented, confirming a reduction in the rationing error to 4-6%.

Keywords: pipeline transport, oil pumping station, electricity consumption standards, centrifugal pump, energy efficiency, operating modes, and electricity metering.

УДК 621.314.21:004.7

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

Р.Р. Мустафин

*Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия*

Статья представляет систематический обзор литературы по применению технологии Интернета вещей (IoT) для мониторинга состояния электрических трансформаторов. Проанализированы 120 научных публикаций за период 2014–2024 гг. с использованием методологии PRISMA. Рассмотрены основные исследовательские задачи: диагностика неисправностей (45,8% публикаций), разработка индексов работоспособности (24,2%) и управление жизненным циклом (22,5%). Определены предпочтительные аппаратные и программные решения: микроконтроллер Arduino Uno, платформа ThingSpeak, протокол Wi-Fi, среда разработки Arduino IDE.

Ключевые слова: Интернет вещей (IoT), мониторинг состояния трансформаторов, диагностика неисправностей, управление жизненным циклом.

Введение. Интернет вещей (IoT) связывает физические объекты с цифровым миром через встраивание датчиков и исполнительных механизмов. Термин появился в 1999 году благодаря Кевину Эштону. К концу 2023 года насчитывалось около 16,1 миллиарда подключённых IoT-

устройств, а к 2033 году ожидается рост до 39,9 миллиарда. Мониторинг состояния трансформаторов имеет критическое значение для обеспечения их надёжности. Традиционные методы требуют выезда бригад для ручной оценки, что подвержено ошибкам и не позволяет осуществлять непрерывный мониторинг [1]. Исторически владельцы трансформаторов использовали корректирующее и профилактическое обслуживание. Корректирующее обслуживание гарантирует использование деталей без ограничений, но требует больших трудозатрат и простоев [2]. Профилактическое обслуживание предотвращает катастрофические отказы, но связано с высокими затратами и недостаточным использованием компонентов. С развитием IoT владельцы коммунальных предприятий переходят к прогнозируемому обслуживанию, которое позволяет своевременно заменять компоненты, близкие к отказу, сокращая незапланированные затраты. Первые исследования по применению IoT для мониторинга трансформаторов появились в 2014 году [3]. **Цель статьи** – обзор современных исследований по применению технологии Интернета вещей для мониторинга состояния электрических трансформаторов, выявить основные исследовательские направления, используемые аппаратные и программные решения, региональные особенности, а также определить существующие проблемы и ограничения.

Основная часть. Архитектура IoT для мониторинга трансформаторов обычно включает три уровня: нижний (сенсорный) – датчики температуры, напряжения, тока, уровня масла; средний (сетевой) – каналы связи (Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, GSM); верхний (сервисный) – облачные платформы для хранения и визуализации данных [4]. Наиболее распространёнными датчиками являются ACS712 (ток), Zmpt101B (напряжение до 250 В), MQ-7 (угарный газ), MQ-4 (метан), а также инфракрасные датчики для контроля горячих точек. Частичный разряд является основной причиной износа трансформаторов; его мониторинг возможен через анализ растворённых газов (DGA), что позволяет выявить метан, этан, этилен – признаки перегрева масла [5].

Систематический обзор выполнен по методологии PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Поиск проводился в базах IEEE Xplore, Google Scholar, Science Direct, Emerald Insight, Springer Link, Wiley, Taylor & Francis, ELSEVIER. Из 262 найденных публикаций после фильтрации отобрано 120 за период 2014–2024 гг. Оценка качества включала шесть критериев; все отобранные статьи набрали не менее 75%, из них 21,7% получили 100% [6].

Анализ показывает, что объём исследований начал расти с 2019 года, достигнув пика в 2022 году (35 публикаций). Источники публикаций: конференции составляют 55%, журналы – 45%, что объясняется необходимостью быстрого распространения результатов в быстро развивающейся области. Региональное распределение: Индия – 55% публикаций, Китай – 8,3%, Пакистан – 3,3%, что отражает высокую заинтересованность стран с развивающимися энергосистемами [7].

Основные исследовательские задачи: диагностика неисправностей – 45,8% публикаций (55 статей), разработка индексов работоспособности – 24,2% (29 статей), управление жизненным циклом – 22,5% (27 статей). Управление энергопотреблением составило 4,2% (5 статей), анализ вибрации – 1,7% (2 статьи). Ни в одной из собранных работ не рассматривались частичные разряды или тепловые характеристики, что указывает на существенные пробелы для будущих исследований [8]. Типы трансформаторов: силовые трансформаторы – 49% исследований, распределительные – 40,8%; сухие и измерительные трансформаторы изучены недостаточно. В 11 публикациях тип трансформатора не был указан [9]. Программные и аппаратные средства: Arduino IDE – наиболее популярное программное обеспечение благодаря простоте программирования плат Arduino. Микроконтроллеры: Arduino Uno – наиболее предпочтительный (используется в большинстве прототипов), также применяются ESP8266 и Raspberry Pi. Каналы связи: Wi-Fi доминирует из-за проведения экспериментов в контролируемых зонах; ZigBee подходит для локальных подключений, Sigfox и LoRa – для глобальной связи. Облачные платформы: ThingSpeak – наиболее популярна для визуализации и хранения данных. В 12,5% публикаций не указаны используемые микроконтроллеры, в 20% – не указаны облачные платформы, что создаёт проблемы для воспроизводимости и оценки концепций.

Новые возможности и технологические достижения включают: передовые датчики (оптические датчики для более точного сбора данных), алгоритмы машинного обучения и искусственного интеллекта для классификации и прогнозирования неисправностей, периферийные вычисления для снижения задержек и обеспечения мониторинга в реальном времени при ограниченном подключении к облаку, облачные решения для масштабируемости и анализа больших данных, а также меры кибербезопасности для защиты инфраструктуры.

Основные проблемы и ограничения внедрения IoT: стандартизация – отсутствие единых протоколов затрудняет интеграцию устройств разных производителей; масштабируемость – большое количество устройств, подключённых к одному приложению, создаёт препятствия для управления; совместимость – различные технологические платформы, протоколы и меры безопасности усложняют взаимодействие; энергопотребление – устройства IoT не обладают возможностями сбора энергии, требуется более длительный срок службы батарей; безопасность данных – кибератаки могут привести к краже данных, манипуляции результатами и даже отказу сети; надёжность – критически важна для непрерывного обслуживания [10].

Заключение. Систематический обзор 120 публикаций за 2014–2024 гг. демонстрирует рост интереса к применению IoT для мониторинга состояния трансформаторов. Основные исследовательские направления – диагностика неисправностей, индексы работоспособности и управление жизненным циклом. Предпочтительные технические решения: микрокон-

троллер Arduino Uno, облачная платформа ThingSpeak, протокол Wi-Fi, среда Arduino IDE. Выявлены значительные пробелы в исследованиях: частичные разряды, тепловой анализ, анализ вибрации остаются недостаточно изученными. Региональное лидерство Индии (55% публикаций) указывает на необходимость расширения международного сотрудничества. Ключевые проблемы внедрения – стандартизация, масштабируемость, энергопотребление и кибербезопасность – требуют дальнейших исследований.

Список использованных источников

1. Гатауллин А.М., Губаев Д.Ф. Комплексный метод оценки характера повреждений, их локализации и прогнозирования разрушения изоляторов высоковольтного электрооборудования по характеристикам частичных разрядов // В сборнике: International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Proceedings. – 2023. – С. 171-176.
2. Mishra, N.; Yadav, A.; Yadav, P.; Yadav, A.; Yadav, P. A survey on IoT based Transformer Health Monitoring System. In Proceedings of the 2nd International Conference on Advancement in Electronics & Communication Engineering (AECE 2022), Uttar Pradesh, India, 14–15 July 2022; pp. 765–768.
3. Banumathi, K.; Grace, M.; Kalaikaveya, G.; Shobana, S. Monitoring of Transformer via Internet of Things Using GSM Technology. Int. J. Sci. Res. Sci. Eng. Technol. 2018, 4, 647–651.
4. Gataullin A.M., Gubaev D.F., Khusnutdinov R.R. Automation of high-voltage electrical equipment insulators diagnostics by partial discharges method. В сборнике: Proceedings – 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021. 2021. С. 58-62.
5. Chueapram, C.; Kamata, K.; Rueangphaisan, T.; Srisupawong, Y.; Kamata, N. Development of the smart Transformer Detection Learning Kit Using IoT. Int. J. Inf. Educ. Technology 2022, 12, 1191–1197.
6. Gataullin A.M., Gubaev D.F., Gataullina R.V. Software and hardware system of monitoring high-voltage electric equipment based on the analysis of partial discharge characteristics. В сборнике: International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Proceedings. 2023. С. 171-176.
7. Bethalsha, C.; Jennifer, A.; Karthik, S.; Sreejavijay, S. Real-Time Transformer Health Monitoring using IOT. Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol. 2022, 8, 521–526.
8. Gataullin A.M. Online monitoring of the porcelain insulator units state. В сборнике: 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020. 2020. С. 9271631.
9. Thango, B.A.; Bokoro, P.N. Stray Load Loss Valuation in Electrical Transformers: A Review. Energies 2022, 15, 2333.
10. Gataullin A.M. Online technology of insulators condition monitoring in smart grid power supply systems. В сборнике: 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019. 2019. С. 8934770.

SENSOR TECHNOLOGIES FOR POWER TRANSMISSION AND DISTRIBUTION SYSTEMS

R.R. Mustafin

*Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia*

The article presents a systematic review of the literature on the use of Internet of Things (IoT) technology for monitoring the condition of electrical transformers. 120 scientific publications for the period 2014-2024 were analyzed using the PRISMA methodology. The main research tasks are considered: fault diagnosis (45.8% of publications), development of health indices (24.2%) and lifecycle management (22.5%). Preferred hardware and software solutions have been identified: the Arduino Uno microcontroller, the ThingSpeak platform, the Wi-Fi protocol, and the Arduino IDE development environment.

Keywords: *Internet of Things (IoT), transformer status monitoring, fault diagnosis, lifecycle management.*

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ОБНАРУЖЕНИИ И ЛОКАЛИЗАЦИИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ КАБЕЛЕЙ

Р.Р. Мустафин

*Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия*

Статья представляет обзор методов искусственного интеллекта для обнаружения и локализации неисправностей кабелей в распределительных сетях. Рассмотрены причины отказов кабелей (локальный перегрев, увлажнение изоляции, механические повреждения) и ограничения традиционных методов. Проанализировано применение традиционного машинного обучения (многослойные нейронные сети, SVM, ANFIS, генетические алгоритмы) и глубокого обучения.

Ключевые слова: обнаружение неисправностей кабеля, локализация неисправностей, искусственный интеллект, машинное обучение, глубокое обучение.

Введение. С масштабной интеграцией новых энергетических систем и распределённых генераторов (DG) обнаружение и локализация неисправностей кабеля сталкиваются с многочисленными вызовами. Кабели являются критически важным компонентом городских распределительных сетей, но их эксплуатация осложняется сложными условиями прокладки (глубокое заложение в туннелях), что приводит к частичным разрядам, перегрузкам и даже возгораниям. Традиционные методы обнаружения неисправностей (анализ движущихся волн, токов заземления, токов нулевой последовательности) демонстрируют ограничения при обработке больших объёмов данных, имеют высокую ручную нагрузку и медленное время отклика. Искусственный интеллект, особенно глубокое обучение, позволяет автоматически извлекать иерархические представления признаков из огромных наборов данных, демонстрируя преимущества в точности, скорости и адаптивности [1].

Цель статьи — обзор применения методов искусственного интеллекта, включая традиционное машинное обучение и глубокое обучение, для обнаружения и локализации неисправностей кабелей, а также проанализировать их преимущества, ограничения и влияние интеграции распределённой генерации.

Основная часть. Причины отказов кабелей включают локальный перегрев (при превышении номинальной температуры 90 °С для изоляции XLPE), увлажнение изоляции (снижение пробивного напряжения до 85–94% от нормы) и механические повреждения (образование микропустот, вызывающих частичные разряды) [2].

Традиционное машинное обучение активно применяется для обнаружения и локализации неисправностей. Многослойные нейронные сети (ANN) с алгоритмом обратного распространения достигают точности обнаружения неисправностей с высоким сопротивлением до 97,6% даже при

реконфигурации сети и интеграции DG [3]. Опорные векторные машины (SVM) с функциями ядра обеспечивают точность обнаружения неисправностей до 99,8% при времени выполнения 0,01 с, превосходя kNN, PNN и MLP. Адаптивные системы нейро-нечёткого вывода (ANFIS) интегрируют способность нейронных сетей к обучению с лингвистическими преимуществами нечёткой логики, демонстрируя на 33% более высокую точность при выявлении неисправностей с высоким сопротивлением по сравнению с традиционными нечёткими системами. Генетические алгоритмы (GA) применяются для оптимизации локализации неисправностей с максимальной ошибкой ниже 0,22% при различных условиях неисправности [4].

Глубокое обучение обеспечивает более мощные возможности. Механизмы внимания (включая CBAM и Transformer) позволяют модели концентрироваться на ключевых признаках [5]. Swin Transformer с косинусным отжигом скорости обучения достигает высокой точности в задачах классификации частичных разрядов при малых выборках. Свёрточные нейронные сети (CNN) обрабатывают частотно-временные представления сигналов; комбинация DWT, системы Лоренца и CNN обеспечивает 97,5% точности идентификации типов повреждений изоляции. Остаточные сети (ResNet) с механизмом многоголового внимания (BiGRU-ResNet-MA) достигают 100% точности обучения и 99,3% на тестовой модели IEEE-13 bus. Сети глубокого доверия (DBN) из нескольких слоёв ограниченных машин Больцмана обеспечивают среднюю точность идентификации неисправностей 97,8% и 99,27% при использовании спектров входного импеданса [6].

Для локализации неисправностей применяются одномерные CNN (1D-CNN), которые с бинарной SVM обеспечивают максимальную ошибку локализации в пределах 0,095% при времени обработки ниже 0,15 с. Сети долгой краткосрочной памяти (LSTM) решают проблему затухающих градиентов через механизмы вентилей; CNN-LSTM демонстрирует высокую точность, а комбинация LSTM с вариационным автоэнкодером (VAE) достигает ошибок локализации 1,774% и 1,015% для дефектов кабеля и соединений соответственно. Графовые свёрточные сети (GCN) обрабатывают неевклидовы данные, кодируя топологию сети через матрицу смежности. Гибрид MLP-GCN превосходит случайный лес и CNN по точности, F1-оценке и времени единого вывода [7].

Преимущества методов ИИ включают: извлечение нелинейных признаков через функции активации, позволяющее аппроксимировать любую непрерывную функцию; эффективную обработку сложных данных с использованием тензорных ядер GPU и параллельных вычислений; адаптивное обучение и динамическую оптимизацию через кодирование структуры графов и деформируемую свёртку [8].

Ограничения методов ИИ: высокая зависимость от качества и разнообразия данных (лабораторные данные отклоняются от реальных условий); низкая динамическая адаптивность при изменении топологии кабеля и характеристик распространения волн из-за старения; недостаточная интерпретируемость («чёрный ящик»), что снижает доверие операторов. Для

преодоления этих ограничений перспективны гибридные фреймворки, интегрирующие знаниевые и основанные на данных подходы, включая сети, спроектированные на основе обработки сигналов, и интеграцию физических моделей с глубокими сетями [9].

Интеграция распределённой генерации (особенно ветровой, солнечной энергии и систем хранения) усугубляет сложность диагностики из-за изменчивости выходной мощности, нелинейных искажений (высокое THD, трёхфазный дисбаланс) и изменений топологии сети при дистанционном переключении. Это требует адаптивных систем защиты и передовой коммуникационной инфраструктуры [10].

Заключение. Методы искусственного интеллекта, включая традиционное машинное обучение (ANN, SVM, ANFIS, GA) и глубокое обучение (CNN, LSTM, Transformer, GCN, DBN), значительно повышают точность, скорость и адаптивность обнаружения и локализации неисправностей кабелей по сравнению с традиционными подходами. Ключевые ограничения (зависимость от качества данных, низкая адаптивность, недостаточная интерпретируемость) и вызовы, связанные с интеграцией DG, требуют будущих исследований в трёх направлениях: разработка моделей вычисления признаков неисправности для активных распределительных сетей с учётом реальных условий прокладки; создание синтетических наборов данных, отражающих реальные условия, для обогащения обучающих выборок при дисбалансе классов; оптимизация размещения измерительных приборов на основе топологии сети для баланса экономической эффективности и вычислительной эффективности.

Список использованных источников

1. Гатауллин А.М., Губаев Д.Ф. Комплексный метод оценки характера повреждений, их локализации и прогнозирования разрушения изоляторов высоковольтного электрооборудования по характеристикам частичных разрядов // В сборнике: International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Proceedings. – 2023. – С. 171-176.
2. Чхве, М.С.; Ли, С.Дж.; Лим, С.И.; Ли, Д.С.; Ян, Икс. Прямое обнаружение неисправности на основе анализа трёхфазных схем для неисправности между линиями. IEEE Trans. Power Deliv. 2007, 22, 2541–2547.
3. Ли, Х.С.; Цай, Дж.; Чен, П.; Чжан, Дж.С.; Го, В.; Пан, З.Х.; Цянь, М.Д. Влияние влаги на электрическое поле и пробой напряжения XLPE-кабелей интерконнекторов. AIP Adv. 2024, 14, 115221.
4. Gataullin A.M., Gubaev D.F., Khusnutdinov R.R. Automation of high-voltage electrical equipment insulators diagnostics by partial discharges method // В сборнике: Proceedings – 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021. – 2021. – С. 58-62.
5. Арчана, Р.; Дживарадж, П.С.Е. Модели глубокого обучения для цифровой обработки изображений: обзор. Артиф. Интелл. Rev. 2024, 57, 11.
6. Gataullin A.M., Gubaev D.F., Gataullina R.V. Software and hardware system of monitoring high-voltage electric equipment based on the analysis of partial discharge characteristics // В сборнике: International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Proceedings. – 2023. – С. 171-176.

7. Мохаммед А. Кора, Р. Всесторонний обзор ансамблевого глубокого обучения: возможности и вызовы. Университет Дж. Кинг Сауд – вычислительная наука. 2023, 35, 757–774.

8. Gataullin A.M. Online monitoring of the porcelain insulator units state // В сборнике: 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020. – 2020. – С. 9271631.

9. Донди П., Байюми Д., Хедерли К., Джулиан Д., Сутер М. Сетевая интеграция распределённой генерации электроэнергии. J. Power Sources 2002, 106, 1–9.

10. Gataullin A.M. Online technology of insulators condition monitoring in smart grid power supply systems // В сборнике: 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019. – 2019. – С. 8934770.

ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN CABLE FAULT DETECTION AND LOCALIZATION

R.R. Mustafin

*Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia*

The article provides an overview of artificial intelligence methods for detecting and localizing cable failures in distribution networks. The causes of cable failures (local overheating, humidification of insulation, mechanical damage) and limitations of traditional methods are considered. The application of traditional machine learning (multilayer neural networks, SVM, ANFIS, genetic algorithms) and deep learning is analyzed.

Keywords: cable fault detection, fault localization, artificial intelligence, machine learning, deep learning.

УДК 331.45

ВЛИЯНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА УРОВЕНЬ ТРАВМАТИЗМА И МЕТОДЫ ЕЕ СНИЖЕНИЯ

З.Р. Мустафина, Р.Н. Пигилова

*Казанский Государственный Энергетический университет,
г. Казань, Россия*

В статье рассматривается влияние технического состояния производственного оборудования на уровень производственного травматизма. На основе анализа актуальных данных Минтруда России за 2025 год выявлено, что основной причиной несчастных случаев на производстве остаются организационные факторы, среди которых значимое место занимает техническое состояние оборудования. В работе проанализированы основные виды отказов технических систем, приводящие к травмированию работников, и предложены современные методы снижения травматизма, включая внедрение нового ГОСТ Р 72308-2025 по функциональной безопасности систем управления оборудованием. Особое

внимание уделено системному подходу к управлению безопасностью оборудования на основе оценки профессиональных рисков и реализации профилактических мероприятий.

Ключевые слова: производственный травматизм, безопасность оборудования, функциональная безопасность, системы управления, профессиональные риски, охрана труда, техническое состояние, методы снижения травматизма.

Проблема производственного травматизма остается одной из наиболее острых в современной экономике России. Согласно официальным данным Минтруда России, в 2025 году зафиксирован рост уровня производственного травматизма: увеличилось как общее число несчастных случаев, так и количество тяжелых и смертельных производственных травм [1]. Данная тенденция вызывает обоснованную тревогу со стороны как государственных органов, так и работодателей, поскольку каждое происшествие влечет за собой не только человеческие страдания, но и значительные экономические потери.

В структуре причин несчастных случаев на производстве преобладают факторы организационного характера. Однако среди них особое место занимает техническое состояние производственного оборудования. Нарушение технологических процессов, отказы технических систем, недостаточный уровень их безопасности – все это непосредственно связано с состоянием машин и механизмов, используемых в производственной деятельности [2].

Актуальность данной темы обусловлена также введением в действие с 1 января 2026 года нового национального стандарта ГОСТ Р 72308-2025 «Безопасность оборудования. Руководство по функциональной безопасности системы управления, связанной с безопасностью», который устанавливает современные требования к системам управления оборудованием [3]. Это создает новую нормативную базу для снижения травматизма, связанного с техническими причинами.

Производственное оборудование является источником повышенной опасности для работника. В процессе эксплуатации под воздействием нагрузок, износа, температурных и химических факторов технические характеристики оборудования ухудшаются, что может приводить к отказам и аварийным ситуациям.

На основе анализа данных о несчастных случаях можно выделить следующие основные виды отказов оборудования, приводящие к травмированию работников:

- Механические отказы – разрушение движущихся частей, разрыв приводных ремней, поломка режущего инструмента. Такие отказы часто приводят к травмам от разлетающихся осколков, попаданию в движущиеся механизмы.

- Отказы систем управления – несанкционированный пуск оборудования, отказ тормозных систем, неправильное срабатывание защитной автоматики. Особую опасность представляют ситуации, когда системы безопасности не блокируют опасные режимы работы.

– Электрические отказы – пробой изоляции, короткое замыкание, отказ заземления. Последствиями могут стать электротравмы вплоть до летального исхода, а также возгорания.

– Отказы защитных устройств – неисправность ограждений, блокировок, предохранительных клапанов. Именно эти устройства призваны защищать работника, и их отказ часто становится непосредственной причиной тяжелых травм.

Минтруд России в своем письме от 14.07.2025 № 15-3/10/В-11850 отмечает, что среди несчастных случаев с тяжелыми последствиями преобладает падение пострадавшего с высоты [4]. Однако значительная доля травм связана именно с эксплуатацией неисправного или морально устаревшего оборудования. Косвенным подтверждением этого служат следующие статистические данные:

– нарушение технологического процесса занимает одно из ведущих мест среди причин несчастных случаев [1];

– недостатки в создании и обеспечении функционирования систем управления охраной труда (СУОТ) выявлены в большинстве организаций, где произошли тяжелые несчастные случаи [2];

– отсутствие контроля со стороны руководителей и специалистов за ходом работы, включая контроль технического состояния оборудования, также отнесено к значимым причинам [1].

Важно понимать, что техническое состояние оборудования редко выступает как изолированная причина. Чаще всего травма является следствием совокупности факторов: неисправность оборудования сочетается с недостаточной квалификацией персонала, отсутствием необходимых средств индивидуальной защиты, нарушениями трудовой дисциплины [5].

Снижение травматизма требует комплексного подхода, включающего как совершенствование нормативной базы, так и практические меры на уровне организаций.

На государственном уровне Минтруд России рекомендует:

– постоянный мониторинг уровня травматизма с последующей актуализацией нормативных правовых актов;

– разработку мер по снижению травматизма с учетом результатов мониторинга и включение их в региональные программы;

– активное информирование работодателей о причинах несчастных случаях через вебинары, тренинги, выставки и конкурсы [1].

Важным событием стало утверждение Приказом Росстандарта от 29.09.2025 № 1129-ст нового национального стандарта ГОСТ Р 72308-2025, вводимого в действие с 1 января 2026 года [3]. Данный стандарт, идентичный международному документу IEC TS 63394:2023, содержит руководство по функциональной безопасности систем управления оборудованием, связанных с безопасностью [6]. Стандарт классифицирует функции безопасности оборудования, определяет требования к архитектуре их реализации и методики расчетов надежности.

На организационном уровне основными методами снижения травматизма являются внедрение и постоянное совершенствование Системы управления охраной труда (СУОТ), в которую обязательно должны входить процедуры контроля технического состояния оборудования. Важнейшими задачами остаются идентификация опасностей и оценка профессиональных рисков на каждом рабочем месте, что требует от работодателя выявления угроз, связанных с эксплуатацией техники, и разработки мероприятий по их минимизации. Не менее значимы планомерная модернизация оборудования – реконструкция и замена устаревших станков и механизмов для исключения или снижения опасных производственных факторов, а также обеспечение квалифицированного персонала через своевременное обучение, проверку знаний и стажировку на рабочем месте. Завершающим элементом системы выступает многоступенчатый контроль за соблюдением правил эксплуатации оборудования и оперативное устранение выявленных нарушений [7].

Технические методы направлены на устранение опасности в самом источнике или на пути ее распространения к работнику. К наиболее эффективным техническим методам относятся:

1. Применение систем технического диагностирования – встроенных средств контроля состояния оборудования, позволяющих выявлять неисправности на ранней стадии и предотвращать аварийные ситуации.

2. Проведение плано-предупредительных ремонтов (ППР) в установленные сроки. Эффективность данных мероприятий подтверждается многолетней практикой эксплуатации промышленного оборудования [6].

Поскольку значительная доля инцидентов связана с человеческим фактором, особое внимание следует уделить методам, направленным на повышение компетентности и мотивации персонала: качественное обучение персонала безопасным методам и приемам работы на конкретных типах оборудования, включая отработку практических навыков в учебных классах или на тренажерах; концепция «нулевого травматизма» (Vision Zero), предложенная Международной ассоциацией социального обеспечения. Семь «золотых правил» данной концепции включают формирование лидерства в вопросах безопасности, выявление угроз, определение целей, создание системы безопасности, обеспечение безопасности рабочих мест, повышение квалификации и инвестиции в персонал; усиление контроля за соблюдением производственной дисциплины и недопущение к работе лиц, находящихся в неудовлетворительном состоянии [7].

Таким образом проведенный анализ позволяет сформулировать следующие основные выводы:

- Техническое состояние производственного оборудования является одним из ключевых факторов, влияющих на уровень производственного травматизма. Несмотря на то, что формально большинство несчастных случаев относят к организационным причинам, техническое состояние оборудования часто выступает в роли непосредственной или сопутствующей причины происшествия.

– Наиболее опасными видами отказов оборудования являются отказы систем управления и защитных устройств, а также механические разрушения движущихся частей. Именно отказы средств активной безопасности часто приводят к тяжелым травмам.

– Введение с 1 января 2026 года ГОСТ Р 72308-2025 создает современную нормативную базу для проектирования, эксплуатации и модернизации систем управления оборудованием в части функциональной безопасности.

На основе проведенного анализа предлагаются следующие практические рекомендации для организаций:

Направление	Конкретные мероприятия	Ожидаемый эффект
Организационное	Внедрение и сертификация СУОТ по ГОСТ Р 72308-2025	Системный подход к безопасности
Техническое	Модернизация систем управления с учетом требований функциональной безопасности	Снижение риска отказов защитных систем
Образовательное	Регулярное обучение персонала и проверка знаний	Повышение компетентности работников
Мотивационное	Внедрение элементов концепции «нулевого травматизма»	Формирование культуры безопасности

Реализация данных рекомендаций в комплексе позволит существенно снизить уровень травматизма на производстве, связанного с неудовлетворительным техническим состоянием оборудования.

Список использованных источников

1. Письмо Минтруда России от 14.07.2025 № 15-3/10/В-11850 «О рекомендациях по снижению уровня производственного травматизма». – М., 2025. – 5 с.

2. Минтруд России: О рекомендациях по снижению уровня производственного травматизма [Электронный ресурс] // ГАРАНТ.РУ. – 2025. – URL: <https://www.garant.ru/news/1861513/> (дата обращения: 12.05.2026).

3. Приказ Росстандарта от 29.09.2025 № 1129-ст «Об утверждении национального стандарта Российской Федерации ГОСТ Р 72308-2025/IEC TS 63394:2023». – М., 2025. – 3 с.

4. Кадровое Дело: Уровень производственного травматизма в России вырос: Минтруд разъяснил, как снизить [Электронный ресурс]. – 2025. – URL: <https://www.kdelo.ru/news/399974> (дата обращения: 12.05.2026).

5. Пигилова, Р.Н. Снижение травматизма при внедрении автоматизированных систем управления производственных процессов на энергетических предприятиях / Р.Н. Пигилова, Ф.М. Филиппова, Ю. А. Аверьянова // Омский научный вестник. – 2024. – № 4(192). – С. 44-51. – DOI 10.25206/1813-8225-2024-192-44-51. – EDN ZAAQOZ.

6. ГОСТ Р 72308-2025/IEC TS 63394:2023. Безопасность оборудования. Руководство по функциональной безопасности системы управления, связанной с безопасностью. – Введ. 2026-01-01. – М.: ФГБУ «Институт стандартизации», 2025. – 114 с.

7. Стратегия «Нулевой травматизм»: рекомендации для работодателей [Электронный ресурс] // Официальный сайт Администрации Окуюловского муниципального района. – 2025. – URL: <https://okulovskij-r49.gosweb.gosuslugi.ru> (дата обращения: 12.05.2026).

INFLUENCE OF THE TECHNICAL CONDITION OF PRODUCTION EQUIPMENT ON THE LEVEL OF INJURIES AND METHODS OF ITS REDUCTION

Z.R. Mustafina, R.R. Dyganova

*Kazan State Energy University,
Kazan, Russia*

This article examines the impact of the technical condition of production equipment on the incidence of occupational injuries. Based on an analysis of current data from the Russian Ministry of Labor for 2025, it was found that organizational factors remain the primary cause of industrial accidents, with the technical condition of equipment playing a significant role. The paper analyzes the main types of technical system failures leading to worker injuries and proposes modern injury reduction methods, including the implementation of the new GOST R 72308-2025 standard on the functional safety of equipment control systems. Particular attention is paid to a systems approach to equipment safety management based on occupational risk assessment and preventive measures.

Keywords: occupational injuries, equipment safety, functional safety, control systems, occupational risks, occupational safety, technical condition, injury reduction methods.

УДК 621.315.694

РАССМОТРЕНИЕ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЙ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Б.Н. Мухтаров, Д.М. Валиуллина

*Казанский государственный энергетический университет,
Казань, Россия*

В данной работе рассматриваются устройства определения мест повреждения. Определено несколько групп устройств ОМП. Наиболее подробно рассмотрены фиксирующие приборы и используемые методы, а также выделены формальные требования к устройствам определения мест повреждения.

Ключевые слова: воздушные линии, короткие замыкания, фиксация, прибор.

В настоящее время стремительные темпы развития электрических сетей и сокращения количества обслуживающего персонала требуют эффективных технических решений в области мониторинга состояния сетей.

В связи с большим количеством сетей среднего напряжения достаточно распространены устройства определения мест повреждения (ОМП), ус-

танавливаемые на воздушных линиях (ВЛ) электропередач. Данные устройства предназначены для ОМП при коротких замыканиях (КЗ) и при замыканиях на землю. Важно отметить, что оперативный поиск места повреждения имеет высокий приоритет у электросетевой организации, т.к. отключение или повреждение линии ведёт к недополучению потребителем электроэнергии – это ведёт к снижению прибыли электросетевой организации.

Необходимо произвести классификацию устройств ОМП по следующим группам:

1. Приборы с фиксацией места повреждения на воздушных линиях электропередач. Такие устройства могут в автоматическом режиме производить фиксацию изменения параметров в условиях нормального, аварийного и послеаварийного электроэнергетического режима;

2. Устройства для определения поврежденных участков сети при КЗ; Рассмотрим более подробно фиксирующие приборы ОМП [1].

На данный момент существует различные виды фиксирующих приборов ОМП, наиболее популярные в сетях 10 кВ являются: ФИП-1, ФИП-2, а также ФМК-10, Сириус-2-ОМП. Важно отметить, что данные приборы автоматически осуществляют мониторинг параметров электроэнергетического режима постоянно, в том числе во время технологического нарушения. Для качественного выполнения мониторинга состояния сетей присутствуют некоторые требования, которые позволяют выявлять место и момент повреждения ВЛ. Выделим их:

- скорость измерения: измерение должно быть завершено до завершения цикла запуска и работы устройства релейной защиты;

- время хранения данных: прибор должен сохранять зафиксированное значение параметров в течение заданного времени для предоставления полного объема информации оперативно-выездной бригаде или иметь возможность передачи информации на сервер службы линий и подстанций;

- селективность: прибор должен быть спроектирован таким образом, чтобы фиксировать контролируемую величину только при аварийных отключениях линий;

- точность измерения: прибор должен обеспечивать определенную точность измерения. Обычно допустимая относительная погрешность не должна превышать 5% [2].

Наиболее распространёнными являются фиксирующие приборы с конденсаторами. Во время КЗ конденсатор оперативно заряжается до уровня напряжения, соответствующему току короткого замыкания. После этого включается считывающее устройство, которое, взаимодействуя с элементом долговременной памяти, фиксирует полученные данные. Такая схема гарантирует выполнение требований быстрого измерения до момента отключения линии защитой и возможности длительного хранения зафиксированных значений. Данный принцип, рассмотренный выше, применяется в приборах типа ФИП. Но необходимо отметить недостатки

приборов ФИП – при определении места повреждения необходимо проводить дополнительные расчёты с целью повышения точности.

Важно отметить, что в случае фиксации прибором изменения тока нагрузки в предшествующем режиме, который был до короткого замыкания, присутствует возможность зафиксировать изменение тока в линии. Помимо фиксации токовой нагрузки, можно дополнительно измерить напряжение, тем самым определить сопротивление. С целью минимизации воздействия шунтирования нагрузки можно дополнительно произвести замеры тока в предшествующем режиме. Фиксация параметров режима осуществляются, а затем при помощи аналого-цифрового преобразователя отдаются прибору. Важно отметить, что данные приборы также фиксируют реактивное сопротивление, что позволяет наиболее точно определять место КЗ. Значения реактивного сопротивления через определённый алгоритм обрабатываются и в качестве результата дают информацию в километре от начала линии предполагаемого места КЗ. К вышеперечисленному алгоритму и логике работы относятся фиксирующие омметры типа ФМК-10, ФИС и др. [3].

Также одним из перспективных методов ОМП на ВЛ можно назвать волновой метод. Важно отметить, что данный метод фиксирует момент времени, когда произошёл переходный процесс на линии электропередач. В настоящее время данный метод ОМП содержит в себе элементы искусственных нейронных сетей на основе алгоритма обратного распространения ошибки с минимальным количеством используемых нейронов. Сложность данного метода заключается в необходимости фильтрации помех высокой частоты, которые затрудняют распознавание и анализ получаемых сигналов, тем самым ухудшая точность ОМП. Для повышения точности авторами [4] предлагается разработка устройства с использованием метода стохастического резонанса и вейвлет-преобразований.

Подводя итоги, можно сказать, что для ОМП в электрических сетях существует достаточно большой ассортимент приборов и методов, рассмотрение особенностей которых не ограничивается данным исследованием.

Список использованных источников

1. Спода, А.Е. Способы поиска мест повреждения воздушных линий в сетях 10кВ / А.Е. Спода // Актуальные проблемы энергетики. СНТК72 . – 2016. – С. 220-223.
2. Карабанов, Б.Д. Устройства для определения мест повреждения на воздушных электрических линиях / Б.Д. Карабанов, А.Е. Чукилев // Севергеозкотех-2022 : Материалы XXIII Международной молодежной научной конференции, Ухта, 16–18 марта 2022 года. – Ухта: Ухтинский государственный технический университет, 2022. – С. 29-36.
3. Кузнецов, А.П. Определение мест повреждения на воздушных линиях электропередачи / А.П. Кузнецов. – Москва: Энергоиздат, 1989. – 50 с.
4. Лачугин, В.Ф. Волновые методы определения места повреждения на воздушных линиях электропередачи / В.Ф. Лачугин // Релейная защита и автоматизация. – 2023. – № 1(50). – С. 58-61.

CONSIDERATION OF DEVICES FOR DETERMINING DAMAGE LOCATIONS OF OVERHEAD POWER LINES

B.N. Mukhtarov, D.M. Valiullina

*Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia*

In this paper, devices for determining damage locations are considered. Several groups of WMD devices have been identified. The fixing devices and the methods used are considered in the most detail, as well as the formal requirements for damage detection devices are highlighted.

Keywords: overhead lines, short circuits, locking, device.

УДК 621.314.21:004.9

ОБЗОР СЕНСОРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Э.А. Нуртдинова

*Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия*

Статья посвящена обзору современных сенсорных технологий для мониторинга состояния силовых трансформаторов. Показано, что трансформаторы являются одним из самых дорогостоящих элементов электросетей, а их старение и отказы приводят к значительным экономическим потерям.

Ключевые слова: силовые трансформаторы, мониторинг состояния, сенсорные технологии, волоконно-оптические датчики, частичные разряды.

Введение. Электроэнергетика критически важна для экономики, но растущий спрос, старение инфраструктуры и экстремальные погодные явления создают риски для активов. Силовые трансформаторы – одни из самых дорогостоящих элементов сетей; их отказ ведёт к перебоям и экономическим потерям [1]. С возрастом трансформаторов риск растёт, поэтому мониторинг состояния необходим для снижения простоев. Эффективный мониторинг должен выявлять ухудшение и прогнозировать проблемы до серьёзных сбоев. Традиционное обслуживание базировалось на физической защите, но современные требования привели к онлайн-мониторингу. Продление срока службы трансформаторов выгоднее их дорогостоящей замены [2].

Цель статьи — обзор современных сенсорных технологий, используемых для мониторинга состояния силовых трансформаторов, включая их типы, области применения, достижения, ограничения и перспективные направления развития.

Основная часть. Традиционные методы контроля состояния включают анализ растворённых газов (DGA) для выявления неисправностей,

тестирование коэффициента мощности для обнаружения влаги и загрязнений, измерение сопротивления обмоток, проверку коэффициента трансформации и термографию для обнаружения перегрева [3]. Эти методы тесно связаны с промышленными стандартами IEEE, IEC, ASTM и ISO, которые обеспечивают точность и надёжность измерений. Однако современные системы мониторинга используют различные датчики – электрические, химические, механические, акустические и оптические – для отслеживания широкого спектра параметров в режиме реального времени [4].

Датчики для мониторинга сердечника трансформатора включают трёхосные тензометрические датчики для измерения магнитострикционной деформации, а также датчики «bendductor» из электротехнической стали для измерения магнитомеханических усилий с точностью до 0,05 Н. Для обнаружения частичных разрядов (PD) в сердечнике разработаны многоканальные акустические эмиссионные системы, объединяющие волоконно-оптические датчики и пьезодатчики из цирконата-титаната свинца (PZT), достигающие средней ошибки локализации менее 10 мм. Катушки Роговского с ферритовыми и тефлоновыми сердечниками эффективно обнаруживают полные разряды, причём тефлоновые катушки обеспечивают лучшую помехоустойчивость в диапазоне 5–10 МГц.

Для мониторинга обмоток широко применяются датчики вибрации на основе волоконно-оптических технологий. Датчики с волоконными брэгговскими решётками (FBG), изготовленные из полиэфирэфиркетона (PEЕК), демонстрируют чувствительность 2,39 пм/Н, что в 5,61 раза выше, чем у традиционных датчиков [5]. Встроенные датчики Фабри-Перо (F-P) с частотно-модулированной интерферометрией обеспечивают частоту дискретизации 100 кГц и измерение вибраций до 10 кГц с отношением сигнал/шум около 72,26 дБ. Датчики FBG, встроенные в зажимы из армированного углеродным волокном полимера, позволяют измерять деформацию от вибраций сердечника с повышением чувствительности на 19% и точно регистрировать частоты до 500 Гц. Датчики температуры включают термпары, Pt100, инфракрасные и волоконно-оптические датчики. Датчики Pt100 широко используются в сухих трансформаторах благодаря высокой точности и экономичности. Волоконно-оптические датчики с флуоресцентными наконечниками или наконечниками из арсенида галлия (GaAs) обеспечивают высокую точность и устойчивость к электромагнитным помехам, интегрируясь в системы SCADA через RS-485 или Ethernet. Теллуриновые флуоресцентные стёкла, легированные $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$, показали максимальную погрешность измерения в пределах $\pm 0,8$ К и время отклика 2,1 с. Распределённые волоконно-оптические датчики на основе комбинационного и бриллюэновского рассеяния позволяют измерять температуру вдоль всего волокна с высокой точностью [6].

Для мониторинга трансформаторного масла разработаны различные датчики: волоконно-оптические U-образные (оценка показателя преломления), наклонные FBG с покрытием Ge-Sb-Se-Te (чувствительность 9,952 дБ/RIU), мета-поверхностные кольцевые резонаторы (2,94 ГГц), кварцевые

камертоны (измерение плотности, вязкости, диэлектрической проницаемости с погрешностью 2–6%), а также молекулярно-импринтированные полимеры для обнаружения 2-фуральдегида [7].

Датчики влажности используют методы титрования по Карлу Фишеру, измерение тока поляризации и деполяризации, спектроскопию в частотной области. Датчики активности воды, расположенные в трансформаторном масле, обеспечивают непрерывные измерения с временем отклика в минуты. Датчики FBG с полиимидным покрытием эффективно работают как с минеральными, так и с синтетическими эфирными маслами. Емкостные датчики на основе анодированного алюминия с пористым слоем Al_2O_3 чувствительны к влажности в диапазоне 180–800 ppm. Микро-нановолоконные датчики (MNF) с диаметром от 800 нм до 125 мкм демонстрируют высокую чувствительность (1,8 ppm) и сохраняют работоспособность при температурах от 30 до 80 °С.

Для частичных разрядов применяют UHF-датчики и волоконно-оптические интерферометры (Майкельсона, Фабри-Перо, Саньяка, Маха-Цендера), а также FBG (20–500 кГц). Для вводов – неинвазивные емкостные датчики, для OLTC – беспроводные сети на ZigBee и ARM с диагностикой по STFT и SVM (точность >99%). Используются коммерческие датчики температуры, газов, вибраций и FMEA для оценки рисков [8].

Коммерчески доступные датчики от различных компаний играют ключевую роль в мониторинге температуры, растворённых газов, вибраций и влажности. Анализ режимов и последствий отказов (FMEA) используется для систематического выявления потенциальных отказов, оценки их серьёзности, вероятности и возможности обнаружения, а также для разработки стратегий снижения рисков [9]. Несмотря на достижения, остаются проблемы: уязвимость датчиков к экстремальным температурам, высокому напряжению и химическим загрязнениям; долговременная стабильность и долговечность; сложность интеграции нескольких датчиков в единую систему; а также сложность онлайн-оценки влажности в твёрдой изоляции из-за отсутствия прямого доступа [10].

Заключение. Современные сенсорные технологии, особенно волоконно-оптические датчики (FBG, интерферометры) и беспроводные сенсорные сети, обеспечивают значительный прогресс в мониторинге состояния силовых трансформаторов. Они позволяют измерять температуру, влажность, частичные разряды, растворённые газы, вибрации и механические деформации с высокой чувствительностью и устойчивостью к электромагнитным помехам. Однако практическое внедрение сталкивается с проблемами долговременной стабильности, защиты от суровых условий эксплуатации и сложности интерпретации данных.

Список использованных источников

1. Гатауллин А.М., Губаев Д.Ф. Комплексный метод оценки характера повреждений, их локализации и прогнозирования разрушения изоляторов высоко-

вольтного электрооборудования по характеристикам частичных разрядов // В сборнике: International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Proceedings. Спода А.Е. 2023. Спода А.Е. С. 171-176.

2. Abbasi, A.R. Fault detection and diagnosis in power transformers: A comprehensive review and classification of publications and methods. *Electr. Power Syst. Res.* 2022, 209, 107990.

3. Singh, R.P.; Sonawane, A.V.; Satpute, M.S.; Shirsath, D.Y.; Thakre, M.P. A Review on Traditional Methods of Condition Monitoring of Transformer. In *Proceedings of the 2020 International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC)*, Coimbatore, India, 2–4 July 2020; pp. 1144–1152.

4. Gataullin A.M., Gubaev D.F., Khusnutdinov R.R. Automation of high-voltage electrical equipment insulators diagnostics by partial discharges method. В сборнике: *Proceedings – 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021*. 2021. С. 58-62.

5. Simplicie, A.; Behjat, V.; Kung, P.; Fofana, I. *Assessing Water Content and Vibration from Dynamic Measurement in Transformer*; Springer Nature: Singapore, 2019.

6. Gataullin A.M., Gubaev D.F., Gataullina R.V. Software and hardware system of monitoring high-voltage electric equipment based on the analysis of partial discharge characteristics. В сборнике: *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Proceedings*. 2023. С. 171-176.

7. N'cho, J.; Fofana, I.; Hadjadj, Y.; Beroual, A. Review of Physicochemical-Based Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers. *Energies* 2016, 9, 367.

8. Gataullin A.M. Online monitoring of the porcelain insulator units state. В сборнике: *2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020*. 2020. С. 9271631.

9. Adhikari, K.; Sarkar, B.; Jasper, D.; Roy, N.K. Development of Optical Fiber Sensor for Partial Discharge Detection in High Voltage Power Transformers. In *Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Power Systems Technology (POWERCON)*, Virtual, 7–8 December 2020; pp. 1–6.

10. Gataullin A.M. Online technology of insulators condition monitoring in smart grid power supply systems. В сборнике: *2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019*. 2019. С. 8934770.

OVERVIEW OF SENSOR TECHNOLOGIES FOR MONITORING THE CONDITION OF POWER TRANSFORMERS

E.A. Nurtdinova

*Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia*

The article is devoted to an overview of modern sensor technologies for monitoring the condition of power transformers. It is shown that transformers are one of the most expensive elements of power grids, and their aging and failures lead to significant economic losses.

Keywords: *power transformers, status monitoring, sensor technologies, fiber-optic sensors, partial discharges.*

СЕНСОРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Э.А. Нуртдинова

*Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия*

Статья посвящена обзору современных сенсорных технологий для мониторинга состояния силовых трансформаторов. Показано, что трансформаторы являются одним из самых дорогостоящих элементов электросетей, а их старение и отказы приводят к значительным экономическим потерям.

Ключевые слова: силовые трансформаторы, мониторинг состояния, сенсорные технологии, волоконно-оптические датчики, частичные разряды.

Введение. Сенсорные технологии являются одним из самых значительных изобретений последних десятилетий. Системы передачи и распределения электроэнергии сегодня в значительной степени опираются на датчики, которые быстро заменяют громоздкие измерительные приборы благодаря своим неинвазивным и бесконтактным свойствам. Это увеличивает срок службы, снижает потребность в изоляции и ускоряет обнаружение неисправностей [1].

Цель статьи — обзор современных сенсорных технологий, используемых для мониторинга состояния оборудования в системах передачи и распределения электроэнергии, включая их типы, области применения, достижения, проблемы и перспективные направления развития.

Основная часть. Электросеть сталкивается с множеством проблем: экстремальные погодные условия вызывают провисание и раскачивание проводов, грозы создают магнитные поля, влага и загрязнения приводят к дуговым пробоям изоляторов. Датчики позволяют осуществлять мониторинг в реальном времени и переходить к обслуживанию по состоянию оборудования [2].

Силовые трансформаторы – наиболее дорогостоящие компоненты подстанций. Для их мониторинга используется анализ растворённых газов (DGA) с помощью полупроводниковых, электрохимических и оптических газовых датчиков для обнаружения водорода, метана, ацетилена и оксида углерода. Волоконно-оптические датчики с поверхностным плазмонным резонансом и молекулярно-импринтированными полимерами обнаруживают фуран-2-карбальдегид – признак пробоя диэлектрика. Датчики влажности на основе полиимидных плёнок и ёмкостные датчики контролируют содержание воды в масле [3]. Акустические датчики (пьезоэлектрические акселерометры, гидрофоны) и распределённые акустические системы на основе эффекта Рэлея обнаруживают частичные разряды. Датчики на поверхностных акустических волнах и волоконно-оптические датчики температуры (FBG) измеряют температуру обмоток. Для распределительных

трансформаторов из-за их меньшей стоимости основное внимание уделяется недорогим датчикам температуры обмоток и решениям на основе АМІ и SCADA [4].

Воздушные линии электропередачи подвержены коррозии, вибрациям (эоловым, скачкам), провисанию и обрывам. Магнитные датчики TMR, установленные на опорах, регистрируют изменения магнитного поля при деформациях проводов. Датчики Холла, катушки Роговского с оптическим опросом и волоконно-оптические датчики тока используются для измерения токов утечки и короткого замыкания. Датчики температуры на поверхностных акустических волнах и сагометры контролируют нагрев проводников. Для мониторинга провисания применяются оптические датчики на волоконных решётках Бриггса, а также БПЛА с лидарным сканированием. Роботизированные системы (Line ReconRobot, ROSETLineBot) используются для инспекции высоковольтных линий [5]. Системы динамической защиты линий (DLR) оснащены беспроводными датчиками температуры, тепловизионными камерами и датчиками влажности. Изоляторы выходят из строя из-за старения, загрязнения и частичных разрядов. Инфракрасная термография обнаруживает перегрев, а неразрушающие методы (рентгеновские лучи, компьютерная томография, ультразвуковая фазированная решётка) выявляют внутренние дефекты. Магнитные датчики TMR фиксируют дуговые разряды. Ядерный магнитный резонанс и односторонние магнитно-резонансные датчики оценивают старение силиконовой резины на микроструктурном уровне [6].

Подземные кабели страдают от частичных разрядов из-за неправильного монтажа и старения изоляции. Для их обнаружения используются высокочастотные трансформаторы тока, катушки Роговского, датчики FBG для регистрации акустической эмиссии, а также сверхвысокочастотные датчики и антенны. Для кабелей большой протяжённости применяется рефлектометрия во временной области для локализации нескольких источников частичных разрядов. Распределительные устройства включают автоматические выключатели, реле и предохранители. Беспроводные сенсорные сети с датчиками ускоряют обнаружение неисправностей. Волоконно-оптические вибрационные датчики на основе интерферометра Саньяка контролируют износ вакуумных дугогасительных трубок. Датчики Холла используются для наблюдения за движением дуги. Лазерные датчики Шак-Гартмана и оптическая эмиссионная спектроскопия визуализируют распределение электронов и паров металла. Датчики температуры на поверхностных акустических волнах предотвращают сжижение газа SF₆ [7].

Опоры линий электропередачи подвержены наклонам, трещинам, вибрациям и оседанию. Датчики наклона и тензодатчики на волоконных решётках Бриггса контролируют деформации. Трёхосевые акселерометры MEMS измеряют вибрации. Для мониторинга ледовых нагрузок используются оптические датчики FBG. Беспроводные узлы LoRa и NB-IoT обеспечивают удалённый мониторинг наклона опор. БПЛА с лидаром и лазерным

сканированием используются для высокоточного трёхмерного измерения наклона опор [8].

Системы накопления энергии подвержены тепловым разгонам, деформациям и утечкам. Электрохимические и фотоионизационные датчики обнаруживают газы электролита до возгорания, волоконно-оптические датчики контролируют заряд и защищают от перегрузки, а методы машинного обучения (свёрточные сети, SVM) выявляют старение и неисправности [9].

Системы контроля молнии используют токовые трансформаторы (500 кА), IP-камеры, датчики поля и TMR-датчики. Оптоволоконные грозотросы с рефлектометрией фиксируют вибрации от токов. Эволюция сенсорики прошла путь от простых приборов к цифровым датчикам и интеграции с SCADA, PMU, FLISR, DSA. Появляются интеллектуальные датчики с самоидентификацией, самодиагностикой и самокалибровкой.

Основные проблемы: кибербезопасность, управление идентификацией, неоднородность и хранение данных, энергопотребление, масштабируемость. Будущие исследования направлены на облегчённые протоколы настройки адресов, пограничную обработку данных, блокчейн и энергоэффективный сбор энергии [10].

Заключение. Современные сенсорные технологии стали неотъемлемой частью систем передачи и распределения электроэнергии. Они обеспечивают мониторинг в реальном времени широкого спектра параметров – от токов и напряжений до акустической эмиссии, химического состава газов, вибраций и температуры. Интеграция датчиков с беспроводными сенсорными сетями (LoRa, ZigBee, NB-IoT), SCADA, PMU, машинным обучением и Интернетом вещей позволяет переходить к прогнозируемому обслуживанию и автоматизированному управлению. На уровне распределительных сетей требуется дальнейшее внедрение интеллектуальных датчиков и усовершенствованных приборов учёта (AMI) для поддержки «умных домов», реакции на спрос и интеграции электромобилей. Будущее развитие связано с интеллектуальными датчиками, обладающими самодиагностикой и самокалибровкой, а также с решением проблем кибербезопасности, энергопотребления и масштабируемости.

Список использованных источников

1. Гатауллин А.М., Губаев Д.Ф. Комплексный метод оценки характера повреждений, их локализации и прогнозирования разрушения изоляторов высоковольтного электрооборудования по характеристикам частичных разрядов // В сборнике: International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Proceedings. – 2023. – С. 171-176.
2. Sun, C.; Ohodnicki, P.R.; Stewart, E.M. Chemical Sensing Strategies for Real-Time Monitoring of Transformer Oil: A Review. IEEE Sens. J. 2017, 17, 5786–5806.
3. Hamed, M.S.; Dadashi, H.I. Survey of different sensors employed for the power transformer monitoring. IETSci. Meas.Technol. 2020, 14, 1–8.
4. Gataullin A.M., Gubaev D.F., Khusnutdinov R.R. Automation of high-voltage electrical equipment insulators diagnostics by partial discharges method. В сборнике:

Proceedings – 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021. 2021. С. 58-62.

5. Wu, T.; Liu, G.; Fu, S.; Xing, F. Recent Progress of Fiber-Optic Sensors for the Structural Health Monitoring of Civil Infra-structure. *Sensors* 2020, 20, 4517.

6. Gataullin A.M., Gubaev D.F., Gataullina R.V. Software and hardware system of monitoring high-voltage electric equipment based on the analysis of partial discharge characteristics. В сборнике: International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Proceedings. 2023. С. 171-176.

7. Peng, J.; Jia, S.; Bian, J.; Zhang, S.; Liu, J.; Zhou, X. Recent Progress on Electromagnetic Field Measurement Based on Optical Sensors. *Sensors* 2019, 19, 2860.

8. Gataullin A.M. Online monitoring of the porcelain insulator units state. В сборнике: 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020. 2020. С. 9271631.

9. Chen, W.; Wang, J.; Wan, F.; Wang, P. Review of optical fibre sensors for electrical equipment characteristic state parameters detection. *High Volt.* 2019, 4, 271–281.

10. Gataullin A.M. Online technology of insulators condition monitoring in smart grid power supply systems. В сборнике: 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019. 2019. С. 8934770.

SENSOR TECHNOLOGIES FOR POWER TRANSMISSION AND DISTRIBUTION SYSTEMS

E.A. Nurtdinova

*Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia*

The article is devoted to an overview of modern sensor technologies for monitoring the condition of power transformers. It is shown that transformers are one of the most expensive elements of power grids, and their aging and failures lead to significant economic losses.

Keywords: *power transformers, status monitoring, sensor technologies, fiber-optic sensors, partial discharges.*

УДК 621.77.04

ПОВЫШЕНИЕ ПОСЛЕРЕМОНТНОГО РЕСУРСА ГИЛЬЗ ЦИЛИНДРОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ МЕТОДОМ ФИНИШНОЙ АНТИФРИКЦИОННОЙ БЕЗАБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

И.Ю. Осипов, А.А. Орехов

*Пензенский государственный аграрный университет,
г. Пенза, Россия*

В статье рассмотрены способы повышения послеремонтного ресурса гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания (ДВС), в том числе методом финишной антифрикционной безабразивной обработки (ФАБО).

Ключевые слова: гильза цилиндров ДВС, ремонт, восстановление, износ внутренней поверхности, ремонтный размер, ФАБО, ресурс.

Надёжность работы двигателя внутреннего сгорания (ДВС) во многом определяется техническим состоянием гильз цилиндров, поскольку именно в зоне контакта поршня, колец и зеркала цилиндра происходят наиболее интенсивные процессы трения и теплового воздействия. В процессе эксплуатации ДВС гильзы цилиндров подвергаются воздействию высоких температур, переменных нагрузок, агрессивных продуктов сгорания топлива и недостатка смазки, что приводит к постепенному ухудшению их эксплуатационных характеристик. Гильза цилиндра является одним из наиболее ответственных элементов цилиндро-поршневой группы ДВС. Её основное назначение заключается в образовании рабочей поверхности цилиндра, по которой перемещается поршень, обеспечении герметичности камеры сгорания, отводе тепла от поршня и газов в систему охлаждения, а также восприятию механических нагрузок от давления газов и трения поршневых колец [1].

Кроме того, поверхность гильзы должна обеспечивать удержание смазки и обладать высокой износо- и коррозионной стойкостью. Важным условием эффективной работы цилиндра является наличие оптимальной микрогеометрии поверхности, способствующей формированию устойчивой масляной плёнки между трущимися деталями. От качества поверхности гильзы зависит интенсивность изнашивания поршневых колец, уровень механических потерь и расход моторного масла. После капитального ремонта ДВС гильзы часто теряют часть своих первоначальных свойств из-за изменения микрогеометрии поверхности и ухудшения трибологических характеристик. Это приводит к снижению компрессии, ухудшению процесса сгорания топливной смеси и уменьшению экономичности ДВС. Поэтому одной из ключевых задач ремонта является повышение послеремонтного ресурса гильз цилиндров, то есть увеличение срока службы до уровня, максимально близкого к новому изделию [2]. Решение данной задачи позволяет не только продлить ресурс ДВС, но и снизить затраты на его дальнейшее обслуживание и ремонт.

Основные дефекты, влияющие на послеремонтный ресурс гильз цилиндров, включают износ зеркала, овальность и конусность, задиры, коррозионно-эрозионные повреждения, трещины, риски и локальные выкрашивания поверхности. Возникновение указанных дефектов связано с длительной эксплуатацией ДВС, нарушением теплового режима, попаданием абразивных частиц в систему смазки и недостаточным качеством технического обслуживания. Наиболее опасными являются задиры и глубокие риски, так как они вызывают интенсивное разрушение масляной плёнки и ускоряют износ сопряжённых деталей. Овальность и конусность рабочих поверхностей гильз цилиндров нарушают нормальное прилегание поршневых колец к стенкам цилиндра, что приводит к ухудшению герметичности камеры сгорания и повышенному расходу масла.

Наиболее характерным и ресурсозначимым дефектом гильз цилиндров ДВС является износ рабочей поверхности (зеркала) гильзы. Именно этот дефект в наибольшей степени определяет снижение компрессии, рост расхода масла и уменьшение общего ресурса ДВС [1]. Износ поверхности сопровождается увеличением зазоров между поршнем и цилиндром, ухудшением теплоотвода и снижением эффективности работы ДВС. Особенно интенсивно изнашивание происходит в верхней части цилиндра, где наблюдаются наиболее высокие температуры и давление газов. В результате длительной эксплуатации на поверхности гильзы образуются зоны неравномерного износа, что дополнительно ухудшает условия работы цилиндро-поршневой группы.

На практике одним из наиболее распространённых и технологически простых способов восстановления гильз цилиндров ДВС является метод ремонтных размеров. Сущность данного метода заключается в увеличении диаметра цилиндра до ближайшего стандартного ремонтного размера путём расточки и последующего хонингования, после чего устанавливается поршень и поршневые кольца соответствующего ремонтного размера. Данный способ получил широкое распространение благодаря своей относительной простоте, доступности оборудования и возможности восстановления геометрических параметров гильзы цилиндра без полной замены детали. Метод ремонтных размеров активно применяется как в условиях специализированных ремонтных предприятий, так и в небольших мастерских.

Метод ремонтных размеров обеспечивает восстановление геометрической формы цилиндра, устранение овальности, конусности и задиров, а также позволяет вернуть требуемую чистоту обработки и шероховатость поверхности. Хонингование, выполняемое после растачивания, формирует на поверхности цилиндра характерную сетку микрорисок, способствующую удержанию масла и улучшению условий смазывания. Благодаря этому повышается качество приработки деталей и уменьшается интенсивность их изнашивания в начальный период эксплуатации после ремонта. Однако при многократном применении ремонтных размеров толщина стенок гильзы постепенно уменьшается, что может привести к снижению её прочности и ухудшению теплоотвода.

Однако при всех своих достоинствах этот способ имеет ряд существенных недостатков, главным из которых является снижение ресурса гильзы. После растачивания изменяются структура поверхностного слоя и физико-механические свойства материала, что может привести к ускоренному изнашиванию в процессе дальнейшей эксплуатации. Кроме того, при использовании ремонтных размеров уменьшается запас материала для последующих ремонтов. В связи с этим возникает необходимость применения дополнительных методов обработки, позволяющих повысить долговечность восстановленных деталей.

Для повышения послеремонтного ресурса гильз цилиндров применяются дополнительные технологические методы, такие как напыление, на-

плавка, антикоррозионная обработка, а также более совершенные методы хонингования: плосковершинное, антифрикционно-деформационное и безабразивное. Использование данных технологий позволяет улучшить структуру поверхностного слоя, повысить твёрдость, уменьшить коэффициент трения и обеспечить более благоприятные условия работы цилиндропоршневой группы [3-5]. Особое внимание уделяется методам, направленным на формирование антифрикционных покрытий, обладающих высокой устойчивостью к изнашиванию и способностью удерживать смазочные материалы.

При помощи антифрикционно-деформационного хонингования на поверхности трения получают прочное антифрикционное покрытие из дисульфида молибдена, графита, меди, олова [6]. Такие материалы обладают низким коэффициентом трения и способны снижать интенсивность контактного взаимодействия между поверхностями. Подобные методы получили название «Финишная антифрикционная безабразивная обработка» – ФАБО. Данная технология рассматривается как одно из наиболее перспективных направлений повышения долговечности деталей ДВС. Её применение позволяет существенно повысить эксплуатационные характеристики гильз цилиндров без значительного усложнения технологического процесса.

Данный метод основан на создании на поверхности детали тонкого функционального слоя, который обеспечивает снижение трения и улучшение условий смазывания. Благодаря этому уменьшается интенсивность изнашивания, повышается устойчивость поверхности к задираобразованию и увеличивается срок службы деталей цилиндропоршневой группы.

Преимущества метода ФАБО заключаются в высокой эффективности, технологической доступности и сравнительно низкой себестоимости. Процесс ФАБО основывается на нанесении на поверхности трения тонкого слоя твердосмазочного материала толщиной до 7 мкм, который способствует улучшению антифрикционных и противоизносных свойств деталей, а также увеличивает контактную жёсткость. При использовании фрикционно-механического метода ФАБО поверхности обрабатываются инструментами из твердосмазочных материалов с применением технологических сред, содержащих поверхностно-активные вещества. Полученное при этом покрытие имеет пористую структуру, что позволяет эффективно удерживать смазочные материалы на контактирующих поверхностях и поддерживать стабильный режим трения.

Во фрикционно-химическом способе ФАБО защитная плёнка, называемая «сервовитной», формируется в результате физико-химических процессов, возникающих между рабочей средой и обрабатываемой поверхностью в условиях механической активации инструмента. При этом инструмент может быть выполнен не только из металлических, но и из неметаллических материалов. Для такого подхода требуемая удельная нагрузка значительно ниже и не превышает 1,0 МПа, что позволяет существенно ускорить процесс обработки. Данный метод обеспечивает возможность создания покрытий заданной толщины на деталях любых

форм и размеров, а также позволяет получать равномерные защитные слои даже на сложных поверхностях.

Применение технологии ФАБО позволяет значительно увеличить износостойкость зеркала гильзы, сократить время приработки механизмов, предотвратить появление задиров и продлить срок службы ДВС. Помимо этого, обработанные поверхности приобретают защиту от проникновения водорода, что минимизирует водородное изнашивание и снижает вероятность разрушения поверхностного слоя. Улучшение трибологических свойств поверхности способствует снижению механических потерь в ДВС, уменьшению расхода топлива и повышению общей эффективности работы силового агрегата.

Методы ФАБО не только повышают износостойкость деталей, но и не требуют сложного дополнительного оборудования. Это практически не увеличивает трудоёмкость и себестоимость производства или ремонта ДВС, что делает процесс удобным для внедрения в производственных условиях. Благодаря сочетанию высокой эффективности, экономичности и технологической простоты ФАБО является перспективным направлением совершенствования технологий восстановления гильз цилиндров ДВС и повышения их послеремонтного ресурса.

Список использованных источников

1. Бугаев, А.М. ФАБО как технологический метод повышения ресурса ДВС / А.М. Бугаев, И.Ю. Игнаткин // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. – № 1-4(55). – С. 36-38. – DOI 10.23670/IRJ.2017.55.063. – EDN XRHGUB.
2. Приходько, И.Л. Повышение послеремонтного ресурса гильз цилиндров автотракторных двигателей финишной антифрикционной безабразивной обработкой (ФАБО) : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / И.Л. Приходько. – Москва, 1993. – 19 с. – EDN ZLISMF.
3. Оликов, А.В. Анализ современных методов упрочнения рабочих поверхностей гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания / А.В. Оликов, А.А. Орехов // Вклад молодых ученых в инновационное развитие АПК России: Сборник статей Международной научно-практической конференции молодых ученых, посвященная 65-летию ФГБОУ ВО Пензенская ГСХА, Пенза, 27–28 октября 2016 года. Том II. – Пенза: Пензенская государственная сельскохозяйственная академия, 2016. – С. 113-115. – EDN XDBIIV.
4. Шуков, Д.А. Способы увеличения послеремонтного ресурса гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания / Д.А. Шуков, А.А. Орехов // Инженерная наука в АПК. Проблемы. Решения. Перспективы: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвящённой 65-летию инженерного факультета, Пенза, 26 октября 2017 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2017. – С. 12-15. – EDN ZUHYSZ.

5. Изучение инновационных технологий ремонта и восстановления деталей машин при преподавании технических дисциплин, связанных с техническим сервисом машин и технологического оборудования / А.А. Орехов, Д.А. Близов, В.А. Лукьяненко, П.А. Орехова // Организационно-методические аспекты повышения качества образовательной деятельности и подготовки обучающихся по программам высшего и среднего профессионального образования : сборник статей Всероссийской (национальной) научно-методической конференции, Пенза, 04–05 декабря 2019 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2019. – С. 144-149. – EDN NZKRGМ.

6. Финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) деталей / В.Ф. Карпенков, В.В. Стрельцов, И.Л. Приходько и др.; Моск. гос. агроинженер. ун-т им. В. П. Горячкина, Акад. проблем качества Рос. Федерации. – Пушино, [М.]: МГАУ, 1996. – 105,[2] с. : ил. : 22 см.; ISBN 5-201-14292-3.

INCREASE OF POST-REPAIRS RESOURCE CYLINDER CASES OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES BY FINISH ANTI-FRICTION NON-AGGRESSIVE PROCESSING

I.Yu. Osipov, A.A Orekhov

*Penza State Agrarian University,
Penza, Russia*

The article discusses ways to increase the post-repair resource of cylinder liners of internal combustion engines (ICE), including the method of finishing antifriction non-abrasive processing (FANP).

Keywords: *cylinder liner of an internal combustion engine, repair, restoration, wear of the inner surface, repair size, FANP, resource.*

УДК 338.5

СЕБЕСТОИМОСТЬ В ДОБЫВАЮЩИХ И ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ОТРАСЛЯХ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДРАЙВЕРОВ ЗАТРАТ И СТРАТЕГИИ ИХ СНИЖЕНИЯ

Л.А. Отставнова, С.А. Сукасян

*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
г. Саратов, Россия*

Статья посвящена сравнительному анализу факторов формирования себестоимости в первичном (добыча угля) и вторичном (переработка лома черных металлов) секторах экономики. На основе официальных данных Росстата выявлены разнонаправленные тенденции: рост «прочих затрат» и фонда оплаты труда в добыче при снижении материалоемкости. Особое внимание уделяется

обоснованию конкурентных преимуществ бизнес-модели рециклинга и разработке практических рекомендаций по снижению себестоимости для предприятия ООО «КМК-Рециклинг», специализирующегося на переработке лома черных металлов.

Ключевые слова: себестоимость, материальные затраты, металлургия, замкнутый цикл, планирование затрат, автоматизация, структура затрат.

Экономическая реальность последних лет отмечена рядом вызовов, среди которых резкие колебания цен на первичные ресурсы, санкционные ограничения в отношении российских промышленных предприятий, острая потребность в импортозамещении. На этом фоне предприятия добывающего сектора сталкиваются с неуклонным ростом затрат, который зачастую не компенсируется соответствующим повышением производительности труда. В то же время отрасль переработки вторичного сырья, особенно лома черных металлов, демонстрирует положительную динамику, становясь важной частью экономики замкнутого цикла. При этом научное сообщество пока не располагает достаточным объемом сравнительных количественных данных, позволяющих сопоставить механизмы формирования себестоимости в первичном и вторичном сегментах металлургии. Исследование Дубровской О.Г., Дубровской С.Д. и Бобрика А.Г. подчеркивает, что сектор переработки отходов находится в стадии трансформации, направленной на достижение целей устойчивого развития посредством перехода на рециклинговые технологии и применения ESG-принципов, что осложняет формирование универсальных методик учета затрат [1]. Поэтому, сравнительный анализ статистических данных по добыче и рециклингу открывает возможности для выработки действенных рекомендаций по оптимизации себестоимости и повышению конкурентоспособности отрасли.

В первичном (добывающем) и вторичном (перерабатывающем) секторах металлургической отрасли формирование себестоимости имеет существенные различия, что связано со спецификой сырьевой базы и технологических процессов переработки. Так, в добывающих производствах на себестоимость влияют особенности залегания полезных ископаемых, сложность горно-геологических условий разработки, возрастающие затраты на вскрышные работы, месторасположение предприятий и логистика, поддержание инфраструктуры, инвестиции в модернизацию основного капитала. Все это вызывает значительную зависимость от импортного специализированного горнодобывающего оборудования, приводит к высокой доле материальных затрат и амортизационных отчислений, увеличивает расходы на рекультивацию земель и уплату экологических платежей, что отражается на увеличении доли прочих затрат.

В общей структуре затрат в добывающих производствах, представленной на рисунке 1, наибольшую долю составляют прочие затраты с максимальным значением 52,8% в 2022 и 2024 годах.

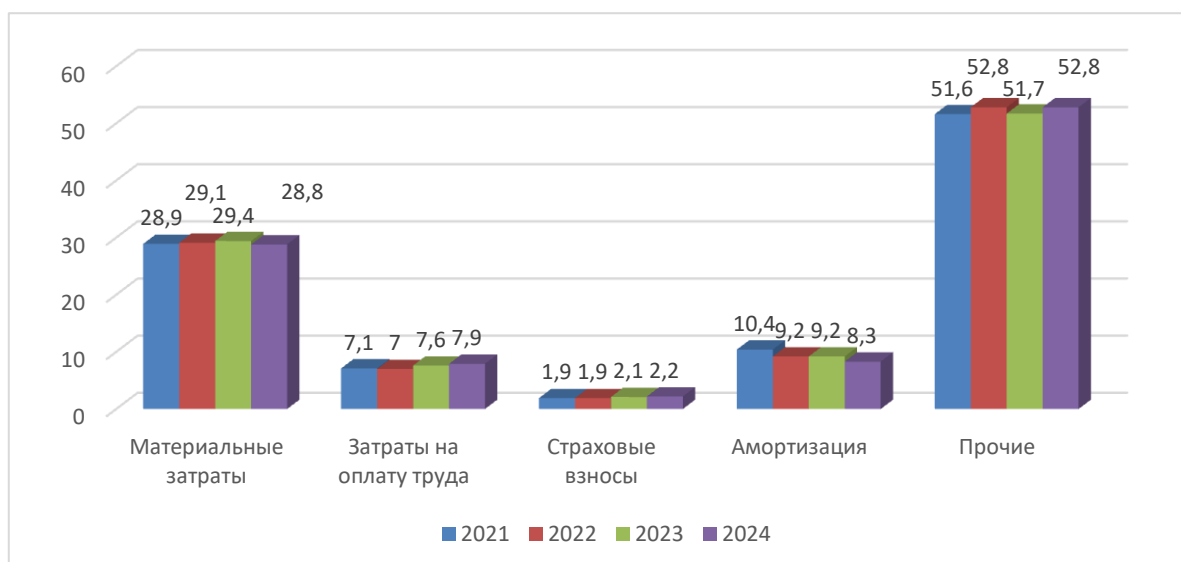


Рисунок 1 – Структура затрат на производство и продажу продукции (товаров, работ и услуг) в добыче полезных ископаемых, % [2]

Второе место занимают материальные затраты, доля которых в 2024 году составляет 28,8%, что на 0,6% ниже предыдущего года. Это связано с сокращением объемов добычи угля на фоне логистических ограничений, санкционного давления и переориентации экспортных потоков. Предприятия стали меньше закупать сырья и материалов, так как снизилась производственная активность. В структуре материальных затрат существенно преобладают расходы на сырье и материалы (10,3% в 2024 году), на топливо и энергию приходится 2,5% и 1,8% соответственно. Наибольшие материальные затраты имеют предприятия, занимающиеся добычей угля (65% в 2024 году, 73,4% в 2021 году). В добыче металлических руд эта доля составляет 52,2% в 2024 году, а в добыче нефти и газа – 19,4%. На третьем месте находятся амортизационные отчисления, которые с каждым годом уменьшаются, что свидетельствует о постепенной модернизации производственных мощностей, изменении их структуры, использовании новых технологий и прогрессивных методов производства, снижающих износ основных фондов. Затраты на оплату труда демонстрируют рост с 2022 года, что связано с постоянством кадровой политики угледобывающих предприятий, ежегодной индексацией заработной платы, повышением минимальной тарифной ставки рабочих и размера компенсаций за тяжелые условия труда.

Предприятия в сфере добычи угля, имеющие самые высокие материальные затраты, характеризуются незначительной долей прочих затрат среди других составляющих добывающего сектора. Динамика этих затрат, представленных налогами, командировочными, транспортными и логистическими расходами, оплатой лизинга и охраны и наиболее чувствительных к вводимым санкциям и росту тарифов, представлена на рисунке 2.

В 2021 году наблюдается незначительный рост (на 4,3 млрд руб.) по сравнению с предыдущим годом. В 2022 году данные затраты существенно

повысились и продолжали расти весь 2023 год, достигнув максимального значения в размере 222,4 млрд руб. Данный рост обусловлен преимущественно внешними факторами: усложнением логистических цепочек, удорожанием импортных запасных частей и оборудования, а также ростом транспортных тарифов в условиях санкционного давления. Угольная отрасль, ориентированная на экспорт, столкнулась с необходимостью перенаправлять грузопотоки, что повлекло за собой дополнительные расходы. В 2024 году наметилось снижение показателя до 202,6 млрд руб. (–9% к пиковому значению), что может свидетельствовать о частичной адаптации отрасли к новым условиям. Однако уровень прочих затрат остается на 70% выше показателей 2021 года.

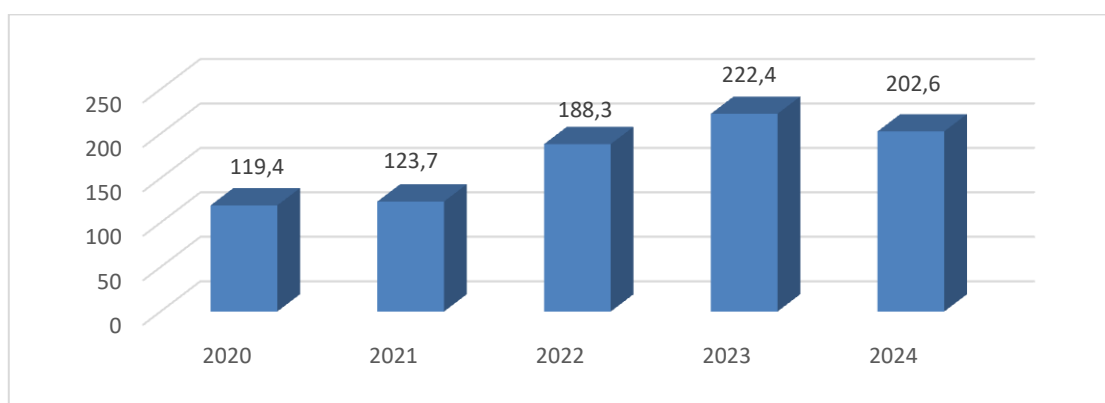


Рисунок 2 – Прочие затраты в сфере добычи угля, млрд руб. [2]

Опыт угледобычи показывает, если при падении загрузки мощностей не сокращать избыточную численность, то себестоимость неконтролируемо растет. Для предприятия по переработке лома это означает, что в плановые расчеты необходимо закладывать иную кадровую стратегию – автоматизацию процессов (рост амортизации вместо ручного труда); гибкое регулирование занятости под сезонность поступления лома; инвестиции в энергоэффективное оборудование для снижения текущих затрат.

Во вторичном секторе (переработка лома черных металлов) модель формирования себестоимости принципиально иная. Ключевые статьи расходов здесь связаны с организацией сбора и логистики вторичного сырья, процессами сортировки и предварительной обработки, непосредственной переработки лома. При этом, рыночная стоимость лома черных металлов уступает цене рудного концентрата при сопоставимых качественных характеристиках сырья. Упрощенная технологическая цепочка переработки и сниженная энергоемкость производства формируют существенные конкурентные преимущества вторичного сектора. Но реализация этих преимуществ напрямую зависит от эффективности логистических процессов, так как транспортные издержки на доставку лома до перерабатывающих предприятий могут составлять значительную долю в структуре себестоимости и в значительной степени определяют итоговую экономическую эффективность продукции.

В отличие от угледобычи, предприятия по переработке лома черных металлов функционируют в логике экономики замкнутого цикла. Как справедливо отмечают В.С. Кудряшов и Е.Д. Малевская-Малевич, «отходы одного предприятия становятся ресурсом для другого» [4].

Так, для ООО «КМК-Рециклинг» сырьевая база – это лом и отходы металлов, стоимость которых формируется на локальном рынке и имеет обратную корреляцию с ценами на первичный металл. ООО «КМК-Рециклинг» снижает риски срыва поставок и ценовых колебаний за счет использования вторичного сырья.

В секторе переработки лома основная доля затрат приходится на амортизацию и энергоснабжение – элементы, которые непосредственно связаны с технологическим процессом и могут быть оптимизированы за счет модернизации оборудования и повышения энергоэффективности. Конкурентное преимущество ООО «КМК-Рециклинг» формируется не за счет масштаба или доступа к дешевым ресурсам, а за счет иной архитектуры затрат: предсказуемой сырьевой базы, управляемой логистики и возможности замещения ручного труда автоматизированными комплексами. Выявление и использование этих преимуществ составляет основу планирования снижения себестоимости на предприятии.

На основе сравнительного анализа структуры затрат в добыче угля и специфики переработки лома черных металлов можно выделить три ключевых направления снижения себестоимости для ООО «КМК-Рециклинг».

Первое направление – автоматизация производства. Как показал анализ рисунка 1, в угледобыче при сокращении объемов производства затраты на оплату труда продолжают расти, что свидетельствует об избыточной численности персонала. Для ООО «КМК-Рециклинг» недопустимо копировать эту модель. Внедрение автоматизированных линий сортировки и переработки лома позволит сократить долю ручного труда, увеличить фондовооруженность и снизить зависимость от дефицита кадров.

Второе направление – оптимизация логистики. Рост прочих затрат в угледобыче до 222,4 млрд руб. в 2023 году (рисунок 2) демонстрирует уязвимость перед внешними факторами. Для переработчика лома логистика сбора сырья является одной из основных статей расходов. Внедрение цифровой платформы для агрегации поставщиков, по аналогии с опытом компании «Технониколь», позволит сократить транспортное плечо, оптимизировать маршруты и снизить долю посредников.

Третье направление – глубокая переработка. Экономическая эффективность переработки возрастает при организации полного цикла с выпуском продукции высокой добавленной стоимости. Для ООО «КМК-Рециклинг» перспективно освоение производства металлизированных брикетов, стальной дробленки и порошков. Это позволит перейти от сырьевой модели к контролируемой структуре себестоимости.

Таким образом, планирование снижения себестоимости в ООО «КМК-Рециклинг» должно основываться на автоматизации, цифровизации логи-

стики и углублении переработки, что обеспечит устойчивость затрат к внешним колебаниям.

Проведенное исследование показало, что модель формирования себестоимости в первичном секторе (на примере добычи угля) характеризуется нарастающей уязвимостью, внешние шоки провоцируют неконтролируемый рост прочих затрат, а падение объемов производства не сопровождается сокращением расходов на оплату труда. Это создает устойчивый дисбаланс, ведущий к удорожанию продукции даже при снижении деловой активности. Для предприятий вторичного сектора, включая ООО «КМК-Рециклинг», данная ситуация открывает конкурентное окно возможностей. Целенаправленное планирование себестоимости через автоматизацию, цифровизацию логистики и углубление переработки позволяет сформировать более устойчивую структуру затрат, невосприимчивую к негативным сценариям, характерным для сырьевых отраслей.

Список использованных источников

1. Дубровская О.Г. Рециклинг отходов металлургической промышленности с получением строительных и сорбционных материалов как элемент реализации принципов ESG / О.Г. Дубровская, С.Д. Дубровская, А.Г. Бобрик // Строительство и техногенная безопасность. – 2024. – № 33 (85). – С. 83–89.
2. Промышленное производство в России. 2025: Стат. сб. / Росстат. – М., 2025. – 250 с.
3. Мешков, Г.Б. Итоги работы угольной промышленности России за I полугодие 2023 года / Г.Б. Мешков, И.Е. Петренко, Д.А. Губанов // Уголь. – 2023. – № 9. – С. 5–13.
4. Кудряшов, В.С. Анализ концептуальных и принципиальных основ модели циркулярной экономической системы / В.С. Кудряшов, Е.Д. Малевская-Малевич // Вестник НИИ гуманитарных наук при Правительстве Республики Мордовия. – 2024. – Т. 16, № 1. – С. 12–20.

COSTS IN THE EXTRACTIVE AND MANUFACTURING INDUSTRIES: A COMPARATIVE ANALYSIS OF COST DRIVERS AND COST REDUCTION STRATEGIES

L.A. Otstavnova, S.A. Sukasyan

*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,
Saratov, Russia*

This article provides a comparative analysis of cost factors in the primary (coal mining) and secondary (ferrous scrap metal recycling) sectors of the economy. Based on official Rosstat data, opposing trends are identified: an increase in «other costs» and labor costs in mining, while material intensity is declining. Particular attention is paid to substantiating the competitive advantages of the recycling business model and developing practical recommendations for cost reduction for KMK-Recycling LLC, a company specializing in ferrous scrap metal recycling.

Keywords: *cost, material costs, metallurgy, closed-loop management, cost planning, automation, cost structure.*

АРХИТЕКТУРА ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ И ПРОТОКОЛА BDSP

**А.А. Пономарев, Е.О. Корабельников,
Д.С. Соловьев, А.В. Самохвалов**

*Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина,
г. Тамбов, Россия*

В работе представлена архитектура распределенной информационно-управляющей системы на основе микроконтроллеров с ограниченными вычислительными ресурсами. Рассмотрена проблема организации пакетной передачи данных поверх потокового протокола TCP при взаимодействии между основным контроллером и периферийными узлами. Предложено использование протокола BDSP на основе алгоритмов COBS-кодирования для эффективного кадрирования потока байтов. Описана архитектура системы, поддерживающая три режима взаимодействия: централизованное управление (основной → ведомый), передачу телеметрии (ведомый → основной) и прямые одноранговые соединения между периферийными контроллерами. Представлена структура прикладного управляющего сообщения. Предложенный подход обеспечивает низкие вычислительные затраты, масштабируемость и отказоустойчивость системы.

Ключевые слова: управляющие системы, микроконтроллеры, протокол BDSP, COBS, TCP/IP, пакетная передача данных.

Современное развитие встраиваемых вычислительных систем характеризуется широким применением микроконтроллеров в задачах управления физическими устройствами, сбором и первичной обработки данных. Не редкой является задача распределенного управления технологическими процессами, робототехникой, а также периферийными вычислительными системами, соответственно возникает необходимость объединения нескольких микроконтроллеров в единую распределенную систему. При этом один из контроллеров, как правило, должен выполнять роль централизованного узла принятия решений (основной контроллер), остальные выступают в качестве управляемых исполнительных или измерительных модулей. Однако на пути построения таких распределенных информационно-управляющих систем существует существенная проблема, связанная с ограничениями существующих протоколов обмена данными между микроконтроллерами. Традиционно для связи между микроконтроллерами используются интерфейсы UART, SPI, I²C, а также беспроводные энергоэффективные протоколы LoRa, Zigbee, BLE. При непрерывной передаче данных, как правило происходит переход к сетевым взаимодействиям по TCP/IP (на основе Wi-Fi или Ethernet). Для обеспечения стабильности и гарантированной доставки данных микроконтроллеры вынуждены работать с потоковым протоколом TCP, который не предоставляет встроенных механизмов пакетной передачи данных.

Существующие подходы к передаче данных между микроконтроллерами через TCP-сокеты обладают следующими недостатками:

1. При использовании протокола HTTP возникают накладные расходы на постоянную передачу служебных данных (текстовые заголовки запросов и ответов);

2. Высокие вычислительные затраты на сериализацию / десериализацию данных при использовании протоколов JSON, XML [1], которые требуют значительных ресурсов оперативной памяти, что критично для бюджетных микроконтроллеров, а также быстрого обмена информацией из-за неоптимальной структуры передаваемых данных.

Таким образом, актуальной является задача использования метода передачи данных, который сочетал бы пакетную ориентированность при работе поверх потокового TCP, минимальные накладные расходы на обработку, возможность работы на микроконтроллерах с ограниченными вычислительными ресурсами и малым объемом оперативной памяти. Для решения задачи в данной работе предлагается использовать протокол передачи данных BDSP (Binary Data Separation Protocol) [2], который реализует эффективный механизм кадрирования потока байтов на основе алгоритмов COBS-кодирования [3], позволяет передавать структурированные пакеты данных по потоковым каналам связи (в том числе по TCP-сокетам), обеспечивает низкую вычислительную сложность за счет операций вставки байт с фиксированной избыточностью, адаптирован к ограниченным ресурсам микроконтроллеров, поддерживает асинхронный режим передачи и приема. Использование протокола BDSP позволяет организовать эффективную пакетную передачу управляющих команд, телеметрии и конфигурационных данных между основным контроллером и периферийными микроконтроллерами, а также между узлами в ячеистой топологии.

Предлагаемая распределенная информационно-управляющая система состоит из одного основного контроллера и произвольного количества периферийных микроконтроллеров. Каждый узел обладает собственной вычислительной способностью и может функционировать автономно, выполняя локальные задачи управления или сбора данных даже при отсутствии связи с основным контроллером. Однако для достижения общей цели системы (координированное управление, распределенная обработка, централизованный мониторинг) вводится режим взаимодействия «основной – ведомые». В данном режиме основной контроллер выступает как центр принятия решений и диспетчер соединений, периферийные контроллеры – как исполняемые или измерительные модули. Общая архитектура системы представлена на рис. 1.

Основной контроллер периодически (через заданный интервал времени) рассылает широковещательные пакеты в локальной сети. Эти запросы сигнализируют как о его присутствии, готовности к работе, так и при его отключении от сети. Все ведомые микроконтроллеры, настроенные на работу в данной системе, прослушивают такие широковещательные сообщения и при получении которых, а также совпадении идентификатора распределенной системы должны инициировать подключение к основному

контроллеру по TCP-сокету. Для передачи прикладных данных поверх TCP используется протокол BDSP, который обеспечивает пакетное кадрирование потока, идентификацию начала и конца сообщений, а также предоставляет 32 идентификатора для пакетов.

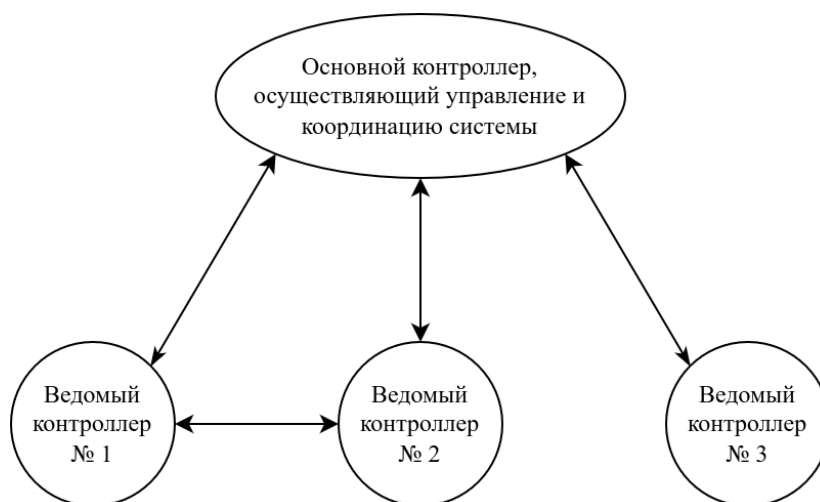


Рисунок 1 – Архитектура информационно-управляющей системы

После установления соединения ведомый контроллер регистрируется у основного контроллера, передавая тип устройства, доступные функции и текущее состояние. Основной контроллер при необходимости передает управляющие сообщения пакеты подключенному ведомому контроллеру через протокол BDSP. Структура прикладного управляющего сообщения представлена в табл. 1.

Таблица 1 – Структура прикладного управляющего пакета

Поле	Размер (байт) и тип данных	Описание
device_id	2 (uint16_t)	Уникальный номер целевого контроллера на основе MAC-адреса
command_type	1 (uint8_t)	Номер управляющей команды
data_lenght	2 (uint16_t)	Размер управляющих данных в байтах
data	0-2048 (uint8_t)	Управляющие данные

При получении управляющего пакета ведомый контроллер помещает его в очередь выполнения с наивысшим приоритетом и при первой возможности должен его обработать. В свою очередь подразумевается, что при отсутствии команд управления от основного контроллера или при отсутствии связи с ним, ведомый может работать в автономном режиме и выполнять собственные задачи, к которым, например, может относиться опрос подключенных датчиков, управление внешними устройствами, а также сбор, обработка и фильтрация данных для телеметрии. Для дополнительного обеспечения отказоустойчивости и корректного определения работоспособности связи основной контроллер через заданные интервалы может обмениваться с ведомым эхо-пакетами, если одна из сторон не от-

вечает, соединение разрывается, а данный инцидент фиксируется и в последствии при восстановлении соединения передается в телеметрии.

Для случаев, когда ведомым контроллерам необходимо произвести обмен данными, система подразумевает возможность построения прямого, однорангового соединения между ними. При возникновении такого исхода, ведомый микроконтроллер №1 (см. рис. 1) обращается к основному и запрашивает у него данные о микроконтроллере №2 по его идентификатору, а конкретно IP адрес, номер TCP-порта для подключения, а также конфигурацию протокола BDSP. Основной, получая такой запрос проверяет уровни доступа и возможность подключения, наличие связи с запрашиваемым узлом и, если доступ предоставить можно – передает данные. В противном случае сообщает код ошибки и фиксирует инцидент в журнале телеметрии. Если возможность подключения, присутствует, а также контроллер №1 поддерживает конфигурацию BDSP протокола контроллера №2, контроллер №1 пытается произвести подключение. Если соединение устанавливается, то на базе открытого TCP-сокета настраивается протокол BDSP для обмена данными и контроллеры начинают прямое взаимодействие. При ошибке установления соединения данный инцидент фиксируется в телеметрии и доносятся до основного контроллера. Прямой канал может быть полезен для обмена показаниями подключенных датчиков, координации деятельности или синхронизации работы.

В рамках системы основной контроллер по большей степени выступает как орган управления, сбора данных телеметрии и обеспечения возможности установления прямых соединений, однако в редких случаях может передавать критически важные данные между контроллерами, если они не могут установить прямое соединение. Данный подход позволяет избежать перегрузки основного контроллера и увеличивает отказоустойчивость системы. Формат обмена сообщениями в рамках системы подразумевает использования трех основных режимов работы, но ими не ограничивается и может быть расширен в конечной реализации. В первом режиме основной микроконтроллер выполняет управляющую функцию и передает ведомым контроллерам команды для исполнения. Второй режим подразумевает передачу телеметрии от ведомых контроллеров к основному в виде событий и статусов, а также полезных данных в рамках реализации системы. Третий режим – прямые соединения между ведомыми контроллерами для обмена данными и синхронизации.

Реализация представленной распределенной архитектуры на основе протокола BDSP для пакетной передачи позволяет достичь высокой стабильности и отказоустойчивости в следствии особенности реализации TCP сокета, обеспечивающего гарантированную доставку данных, а также удобства за счет возможности передачи пакетов в потоковом канале связи. За счет особенностей реализации протокола BDSP, система обмен информацией происходит наиболее эффективным образом – в бинарном виде, а высокая конфигурируемость и гибкость протокола позволяет использовать его в микроконтроллерах с жесткими ограничениями в плане ресурсов и свободной оперативной памяти.

Список использованных источников

1. Молев, А.А. Метод автоматического формирования телекоммуникационных модулей структурных элементов автоматизированных систем на основе XML-описания / А. А. Молев // Информационно-управляющие системы. – 2017. – № 1(86). – С. 40-49. – DOI 10.15217/issnl684-8853.2017.1.40. – EDN YLILMD.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025693163 Российская Федерация. Протокол разделения двоичных данных – BDSP (Binary Data Separation Protocol) : заявл. 24.11.2025 : опубли. 26.11.2025 / А.А. Пономарев. – EDN OVFCVG.
3. Cheshire S., Baker M. Consistent Overhead Byte Stuffing // IEEE/ACM Transactions on Networking. – 1999. – Vol. 7, № 2. – P. 159-172.

ARCHITECTURE OF INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS BASED ON MICROCONTROLLERS AND THE BDSP PROTOCOL

A.A. Ponomarev, E.O. Korabelnikov, D.S. Solovjev, A.V. Samohvalov

*Derzhavin Tambov State University,
Tambov, Russia*

The paper presents the architecture of a distributed information management system based on microcontrollers with limited computing resources. The problem of organizing packet data transmission over the TCP streaming protocol in the interaction between the main controller and peripheral nodes is considered. The use of the BDSP protocol based on COBS encoding algorithms for efficient framing of the byte stream is proposed. The architecture of the system is described, which supports three modes of interaction: centralized control (main → slave), telemetry transmission (slave → main) and direct peer-to-peer connections between peripheral controllers. The structure of the application control message is presented. The proposed approach ensures low computing costs, scalability and fault tolerance of the system.

Keywords: control systems, microcontrollers, the BDSP protocol, COBS, TCP/IP, packet data transmission.

УДК 004.031.6: 681.518.5

МЕТОД СИСТЕМНОЙ ДИАГНОСТИКИ И РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ТЕСТИРОВАНИЯ МИКРОКОНТРОЛЛЕРНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ПРОТОКОЛА BDSP

**А.А. Пономарев, Е.О. Корабельников,
Д.С. Соловьев, А.В. Самохвалов**

*Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина,
г. Тамбов, Россия*

Полное тестирование микроконтроллерных систем требует сбора значительных объемов диагностической информации при жестких ограничениях ресурсов. Традиционные подходы создают конкуренцию за ресурсы между основной задачей и процессом диагностики. Предложен метод системной диагностики на ос-

нове распределенной обработки данных с использованием протокола BDSP. Микроконтроллер выполняет сбор и асинхронную передачу данных, внешний узел – обработку и анализ. Протокол обеспечивает избыточность не более 0,4% для больших объемов данных, побайтовую обработку без буферизации полного пакета. Экспериментальная апробация на микроконтроллерах от STM32F411 до ESP32 показала, что процессорное время на передачу составляет менее 5% от времени выполнения основной задачи. Метод обеспечивает минимальное влияние тестирования на основную задачу микроконтроллера при непрерывной диагностике в режиме реального времени.

Ключевые слова: микроконтроллеры, тестирование систем, распределенная обработка данных, протокол BDSP, асинхронная передача данных.

Повсеместное внедрение микроконтроллерных систем в критически важные области применения повышает требования к методам тестирования и валидации. Мониторинг производительности встраиваемых систем критичен для обеспечения временных требований, при этом сбор данных не должен нарушать работу основной задачи [1]. Актуальны методы непрерывного мониторинга и диагностики в процессе эксплуатации, особенно для систем реального времени [2]. Существующие протоколы связи характеризуются высокими накладными расходами на целевом устройстве [3]. Отсутствие формализованных методов распределенной обработки, при которых микроконтроллер выполняет только функции сбора и передачи информации, затрудняет создание эффективных систем непрерывной диагностики.

Конечное тестирование микроконтроллерных систем требует сбора и анализа значительных объемов диагностической информации при жестких ограничениях по оперативной памяти и вычислительной производительности приближенных к реальным условиям использования. Традиционные подходы предполагают выполнение анализа непосредственно на микроконтроллере, что создает конкуренцию за ресурсы между основной задачей и процессом диагностики. Существующие протоколы связи характеризуются значительными накладными расходами на буферизацию и форматирование данных [4]. Применение текстовых форматов многократно увеличивает объем передаваемой информации. Отсутствие эффективных методов распределенной обработки, при которых микроконтроллер освобождается от ресурсоемких операций анализа, препятствует созданию систем непрерывной диагностики.

Целью данной работы является разработка метода системной диагностики и распределенной обработки данных тестирования микроконтроллерных систем на основе протокола BDSP.

Протокол BDSP (Binary Data Separation Protocol) обеспечивает разделение потока двоичных данных на пакеты с минимальными накладными расходами [5]. В основе лежит модифицированный метод COBS (Consistent Overhead Byte Stuffing) с прогнозируемой избыточностью не более 0,4% для больших объемов данных. Асинхронная архитектура на основе конечных автоматов позволяет побайтовую обработку без буфериза-

ции полного пакета. Декодирование выполняется без буферизации, кодирование требует буфер размером от 16 до 255 байт в зависимости от конфигурации. Выбор протокола BDSP для задачи системной диагностики обусловлен его преимуществами перед альтернативными решениями. Протокол Modbus RTU использует временные задержки для разделения пакетов, что критично при использовании прерываний. Метод вставки байтов в протоколе PPP характеризуется непредсказуемым ростом размера данных до 100% в худшем случае. Текстовые протоколы на основе JSON или XML требуют преобразования бинарных данных в символьное представление, многократно увеличивая объем передаваемой информации и время обработки [4]. Для системной диагностики протокол обеспечивает: минимальное потребление процессорного времени; предсказуемое использование памяти; достоверность передачи за счет контрольных сумм CRC8; передачу данных без блокирования основной задачи микроконтроллера.

Метод системной диагностики и распределённой обработки данных тестирования основан на разделении функций: микроконтроллер выполняет сбор и передачу отладочных данных по протоколу BDSP, внешний узел – их получение, обработку, анализ и формирование выводов. Архитектура включает на стороне микроконтроллера: модуль сбора диагностических данных, передатчик BDSP, минимальный буфер. На стороне внешнего узла: приемник BDSP, модуль анализа, подсистему визуализации, механизм управляющих команд. Общая структура метода представлена на рис. 1.

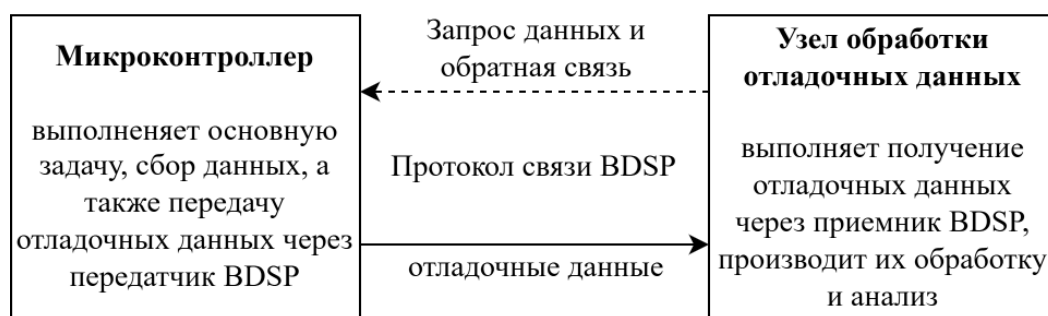


Рисунок 1 – Архитектура метода системной диагностики и распределенной обработки данных тестирования

Диагностические данные могут включать: состояния регистров периферийных устройств, значения переменных в оперативной памяти, временные метки событий, коды ошибок и исключений. Формат пакета содержит идентификатор типа данных (1 байт), временную метку (4 байта), полезную нагрузку переменной длины. Типичные сценарии диагностики: мониторинг состояния АЦП и таймеров, трассировка выполнения критических участков кода, регистрация событий прерываний, контроль использования стека. Микроконтроллер формирует диагностические пакеты с информацией о состоянии системы и передает их асинхронно без ожидания завершения передачи. Внешний узел декодирует поток, восстанавливает пакеты, выполняет валидацию и отображает результаты. При обнаружении

отклонений формируются управляющие команды для динамической настройки диагностики.

Экспериментальная апробация метода проводилась на 32-битных микроконтроллерах STM32F411 (128 КБ ОЗУ, ядро ARM Cortex-M4 100 МГц) и ESP32 (520 КБ ОЗУ, двухъядерный Xtensa LX6 240 МГц). Тестовые задачи включали: обработку данных АЦП с частотой 1 кГц, управление ШИМ-сигналами, обработку прерываний от внешних датчиков. Диагностические данные передавались по UART со скоростью 1000000 бод. Измерения проводились с использованием встроенных таймеров микроконтроллеров и логического анализатора для контроля временных характеристик.

Методология измерения процессорного времени включала два этапа. На первом этапе выполнялась серия из 10 измерений времени выполнения основной задачи без передачи диагностических данных. На втором этапе выполнялась аналогичная серия измерений с активной передачей диагностических данных по протоколу BDSP. Процессорное время на передачу рассчитывалось как относительное увеличение времени выполнения задачи:

$$\Delta t = \frac{t_{\text{с\_передачей}} - t_{\text{без\_передачи}}}{t_{\text{без\_передачи}}} \times 100\%.$$

Результаты показали, что процессорное время на кодирование и передачу составило менее 5% от времени выполнения основной задачи для всех тестируемых платформ. Объем памяти для передатчика BDSP составил 256 байт для STM32F411 и 512 байт для ESP32 в зависимости от размера буфера кодирования. Избыточность протокола при передаче больших объемов данных не превышала 3%. Для малых пакетов до 10 байт избыточность составляет 40%, однако абсолютный объем служебной информации остается минимальным. Контрольные суммы CRC8 обеспечили обнаружение искажений с вероятностью к 99,61%. Время отклика системы от возникновения отклонения до отображения составило менее 11 мс при скорости 1000000 бод. Результаты подтверждают эффективность метода для микроконтроллерных систем с ограниченными ресурсами. Ключевое преимущество – минимальное влияние тестирования на основную задачу за счет асинхронной архитектуры и распределения функций обработки. Преимущества метода: освобождение микроконтроллера от ресурсоемких операций анализа; предсказуемое использование памяти с конфигурированием под ограничения системы; низкая избыточность передаваемых данных; непрерывная диагностика без прерывания основной задачи; масштабируемость для систем различной сложности. Ограничения: зависимость от надежности канала связи; необходимость внешней ЭВМ для обработки данных; задержки передачи, определяемые пропускной способностью канала. Сравнение с традиционными методами показывает, что выполнение анализа на целевом устройстве требует значительных ресурсов и создает конкуренцию с основной задачей. Текстовые протоколы многократно уве-

личивают объем передаваемой информации. Метод на основе BDSP обеспечивает оптимальный баланс между минимизацией накладных расходов и эффективностью передачи данных.

Цель работы достигнута – разработан метод системной диагностики и распределенной обработки данных тестирования микроконтроллерных систем на основе протокола BDSP. Метод обеспечивает минимальное влияние процесса диагностики на выполнение основной задачи микроконтроллера за счет разделения функций между целевым устройством и внешним узлом обработки. Экспериментальная апробация подтвердила эффективность метода для систем с ограниченными ресурсами: процессорное время на передачу данных составляет менее 5%, избыточность протокола не превышает 0,4% для больших объемов данных. Метод применим для непрерывной диагностики микроконтроллерных систем реального времени в процессе разработки и эксплуатации.

Список использованных источников

1. Passig Horstmann L., Conradi Hoffmann J. L., Fröhlich A. A. Monitoring the performance of multicore embedded systems without disrupting its timing requirements // Design Automation for Embedded Systems. – 2023. – Т. 27. – №. 4. – С. 217-239.
2. Parsafar P., Qaderi Baban P. Real-time fault diagnosis system for electrical panel using embedded systems // Journal of Electrical Systems and Information Technology. – 2023. – Т. 10. – №. 1. – С. 37.
3. Murali A., Kakarla H.K., Anitha Priyadarshini G. M. Improved design debugging architecture using low power serial communication protocols for signal processing applications // International Journal of Speech Technology. – 2021. – Т. 24. – №. 2. – С. 291-302.
4. Пономарев А.А., Соловьев Д.С. Метод разделения двоичного потока данных канала связи с низкой избыточностью // Телекоммуникационные и вычислительные системы – 2024 : Сборник трудов тридцать второго международного научно-технического форума, Москва, 11–15 ноября 2024 года. – Москва: Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технический университет связи и информатики», 2024. – С. 284-285. – EDN KIHYLX.
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025693163 Российская Федерация. Протокол разделения двоичных данных – BDSP (Binary Data Separation Protocol) : заявл. 24.11.2025 : опубл. 26.11.2025 / А.А. Пономарев

METHOD OF SYSTEM DIAGNOSTICS AND DISTRIBUTED DATA PROCESSING FOR TESTING MICROCONTROLLER SYSTEMS BASED ON THE BDSP PROTOCOL

A.A. Ponomarev, E.O. Korabelnikov, D.S. Solovjev, A.V. Samohvalov

*Derzhavin Tambov State University,
Tambov, Russia*

Full testing of microcontroller systems requires the collection of significant amounts of diagnostic information under severe resource constraints. Traditional approaches

create competition for resources between the main task and the diagnostic process. A method of system diagnostics based on distributed data processing using the BDSP protocol is proposed. The microcontroller performs data collection and asynchronous transmission, while the external node performs processing and analysis. The protocol provides redundancy of no more than 0.4% for large amounts of data, byte-by-byte processing without buffering the full packet. Experimental testing on microcontrollers from STM32F411 to ESP32 has shown that the processor transfer time is less than 5% of the time required to complete the main task. The method ensures minimal impact of testing on the main task of the microcontroller with continuous diagnostics in real time.

Keywords: *microcontrollers, system testing, distributed data processing, the BDSP protocol, asynchronous data transmission.*

УДК 621.311

ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ СЕВЕРА

В.М. Распопин, Е.О. Мартко

*Алтайский государственный университет имени Ивана Ивановича Ползунова,
г. Барнаул, Россия*

В статье рассматриваются актуальные вопросы обеспечения качества электроэнергии при проектировании систем электроснабжения промышленных объектов, расположенных в сложных климатических условиях северных регионов. Проанализированы основные показатели качества электроэнергии в соответствии с действующими государственными стандартами. Особое внимание уделено влиянию конфигурации сети и специфики грунтов на показатели отклонения напряжения и коэффициенты гармонических составляющих. Предложены рекомендации по выбору проектных решений для минимизации негативного влияния нелинейных нагрузок.

Ключевые слова: *качество электроэнергии, проектирование электроснабжения, отклонение напряжения, высшие гармоники, северные регионы, вечная мерзлота, промышленные предприятия.*

Современный этап развития промышленного потенциала Российской Федерации неразрывно связан с освоением труднодоступных северных территорий. Энергоснабжение таких объектов представляет собой сложную инженерную задачу, решение которой осложняется экстремально низкими температурами и наличием вечномёрзлых грунтов. Одним из важнейших аспектов при проектировании систем электроснабжения (СЭС) является не просто обеспечение бесперебойной подачи мощности, но и поддержание параметров качества электроэнергии (КЭ) на уровне, установленном государственными стандартами.

Качество электроэнергии – это степень соответствия её параметров установленным значениям, при которой электроприемники могут нор-

мально функционировать и сохранять свои эксплуатационные характеристики. Основным нормативным документом в этой области на территории РФ является ГОСТ 32144-2013, который устанавливает показатели и нормы КЭ в точках общего присоединения.

Для промышленного включающего такие энергоемкие объекты, как литейные и кузнечно-прессовые цеха, проблема качества электроэнергии стоит особенно остро. Это связано с тем, что современное производство характеризуется широким использованием нелинейных нагрузок: частотно-регулируемых приводов, мощных выпрямительных установок и дуговых печей. Данные устройства являются источниками высших гармоник тока и напряжения, что ведет к искажению синусоидальности кривой напряжения.

Одним из ключевых параметров КЭ является медленное отклонение напряжения. Согласно нормативам, положительные и отрицательные отклонения напряжения в точке передачи электрической энергии не должны превышать 10% от номинального значения. В условиях северных регионов, где протяженность воздушных линий (ВЛ) 10 кВ может быть значительной из-за территориальной разбросанности цехов, падение напряжения в линиях становится критическим фактором. При проектировании смешанных схем (сочетание радиальных и магистральных линий) необходимо проводить тщательный расчет режимов наибольших и наименьших нагрузок для обеспечения требуемого уровня напряжения у наиболее удаленных потребителей, таких как удаленные склады или испытательные стенды.

Специфика вечномёрзлых грунтов накладывает ограничения на выбор проектных решений. Высокое удельное сопротивление мерзлого грунта затрудняет создание эффективных заземляющих устройств, что напрямую влияет на электромагнитную совместимость оборудования и уровень помех в сети. Недостаточно эффективное заземление при возникновении несимметрии нагрузок (например, в административно-бытовых корпусах или лабораториях) может привести к появлению значительного напряжения несимметрии, что негативно сказывается на работе трехфазных электродвигателей, вызывая их перегрев и преждевременный износ изоляции.

Другим важным параметром является коэффициент гармонических составляющих напряжения. Наличие в СЭС мощных электроприемников I категории надежности, таких как кузнечное производство, требует применения фильтр компенсирующих устройств (ФКУ). Проектирование таких устройств должно осуществляться с учетом резонансных явлений, которые могут возникнуть в сети 10 кВ. Применение трансформаторов с расщепленными обмотками на главной понижающей подстанции (ГПП) 110/10 кВ является эффективным проектным решением, позволяющим локализовать искажения напряжения, создаваемые мощными потребителями на одной секции шин, и минимизировать их влияние на чувствительное лабораторное оборудование, подключенное к другой секции.

Необходимо также учитывать колебания напряжения, вызываемые резкопеременными нагрузками. Резкие толчки тока при пуске мощных аг-

регатов или работе дуговых установок создают кратковременные просадки напряжения. Для нейтрализации данного эффекта в проектах СЭС северных предприятий целесообразно использовать статические тиристорные компенсаторы (СТК) или быстродействующие устройства компенсации реактивной мощности.

При проектировании магистральных схем для групп вспомогательных цехов (склады, аппараты управления) риск накопления искажений КЭ возрастает. Последовательное подключение нескольких КТП к одной линии требует проверки не только по условиям нагрева и потери напряжения, но и по условиям допустимого коэффициента искажения синусоидальности в каждой точке присоединения.

Радиальные схемы электроснабжения, характеризующиеся непосредственным присоединением каждого крупного потребителя к шинам ГПП. Применение таких схем позволяет минимизировать взаимное влияние нагрузок и локализовать помехи, возникающие при работе мощных нелинейных электроприемников. Несмотря на высокую стоимость реализации радиальных сетей в арктических условиях, связанную с увеличением количества опор и фундаментов в мерзлом грунте, их использование является оправданным для питания цехов с преобладанием микропроцессорной техники и систем прецизионного управления.

Таким образом, на этапе проектирования электроснабжения в условиях Крайнего Севера необходимо переходить от простых расчетов мощностей к комплексному моделированию режимов качества электроэнергии. Это обусловлено тем, что стоимость исправления ошибок КЭ на этапе эксплуатации в условиях северного завода и ограниченной транспортной доступности многократно превышает затраты на установку защитного и фильтрующего оборудования на стадии строительства.

В заключение следует отметить, что параметры качества электроэнергии являются таким же важным ресурсом, как и сама активная мощность. Соблюдение требований ГОСТ 32144-2013 при проектировании СЭС северных предприятий позволяет не только продлить срок службы дорогостоящего импортного и отечественного оборудования, но и значительно снизить технологические потери электроэнергии в сетях, что является ключевым фактором энергетической эффективности производства.

Список использованных источников

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 16 с.
2. Кудрин, Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий: учебник для вузов / Б.И. Кудрин. – Москва: Интермет Инжиниринг, 2020. – 672 с. EDN: QAZXSW.
3. Карташев, И.И. Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2017. – 347 с. EDN: RTYHFG.

4. Железко, Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко. – Москва: ЭНАС, 2015. – 456 с. EDN: PLMOKN.

5. Мартко, Е.О. Повышение надежности и эффективности функционирования систем электроснабжения промышленных предприятий: монография / Е.О. Мартко, С.О. Хомутов. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2015. – 186 с.

6. Попов, А.Н. Оптимизация потерь и качества электроэнергии в промышленных сетях: учебное пособие / А.Н. Попов, А.А. Грибанов. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2019. – 154 с.

FEATURES OF ENSURING POWER QUALITY PARAMETERS IN THE DESIGN OF POWER SUPPLY SYSTEMS FOR INDUSTRIAL ENTERPRISES OF THE NORTH

V.M. Raspopin, E.O.Martko

*Polzunov Altai State Technical University,
Barnaul, Russia*

The article deals with topical issues of ensuring the quality of electricity in the design of power supply systems for industrial facilities located in difficult climatic conditions of the northern regions. The main indicators of power quality are analyzed in accordance with current state standards. Special attention is paid to the influence of network configuration and soil specificity on voltage deviation indicators and harmonic component coefficients. Recommendations for the choice of design solutions to minimize the negative impact of non-linear loads are proposed.

Keywords: power quality, power supply design, voltage deviation, higher harmonics, northern regions, permafrost, industrial enterprises.

УДК 621.98.044, 621.791

ПОЛУЧЕНИЕ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ ИЗ РАЗНОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНЫМ НАГРУЖЕНИЕМ

Ж.В. Самохвалова

*Приволжский государственный университет путей сообщения,
г. Самара, Россия*

Рассмотрены технологические возможности получения биметаллического соединения «алюминий – нержавеющая сталь», давлением импульсного магнитного поля. Проведен анализ влияния технологической схемы магнитно-импульсного нагружения на кинематику деформационного процесса. Определены схемы магнитно-импульсного воздействия для получения неразъемного соединения разнородных металлов путем создания локальной зоны сварки.

Ключевые слова: импульсное магнитное поле, разнородные металлы, сварное соединение

В технологических процессах, использующих магнитно-импульсное деформирование, действуют большие по величине объемные электродинамические силы, возникающие непосредственно в материале заготовок при взаимодействии импульсного магнитного поля индуктора с вихревыми токами, наведенным им в электропроводном материале деформируемых заготовок [1]. Для получения неразъемных соединений различных конфигураций деталей магнитно-импульсным нагружением применяются две основные схемы: 1) сборка путем формирования механического (геометрического) зацепления деформируемых элементов деталей; 2) соединение путем обеспечения холодной магнитно-импульсной сварки локальных участков деталей. Это нашло применение как для получения механических узлов машин и агрегатов [2, 3], так и для создания сильноточных электрических соединений [4, 5]. В рамках магнитно-импульсной технологии особую группу составляют технологические процессы сборки и сварки соединений из разнородных материалов.

Рассматривается технология получения неразъемного соединения элементов переходников из разнородных материалов, необходимых в конструкции танк-контейнеров. Они предусмотрены для перевозки сжиженного природного газа и имеют внешнюю и внутреннюю оболочки из различных сплавов. Внутренняя оболочка танк-контейнера изготавливается из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, а его внешняя оболочка – из алюминиевого сплава АД31. Корпуса оболочек соединяются заправочной арматурой – биметаллическими переходниками из этих же материалов. Ниже представлены результаты экспериментального исследования технологии магнитно-импульсной сварки образцов-имитаторов биметаллических переходников, выполненных на базе НИЛ-41 Самарского национального исследовательского университета.

Получению механически прочного биметаллического соединения «алюминий – нержавеющая сталь» жидкофазными технологиями препятствует большая разница температур плавления свариваемых металлов, существенное различие их коэффициентов линейного расширения, большое различие параметров теплопроводности, а также образование интерметаллидов, резко снижающих прочность подобного соединения.

Для получения образца-имитатора биметаллического переходника предлагается магнитно-импульсная сварка концевой части трубчатой наружной обоймы (АД31) с наружным диаметром 29 мм и внутренней втулки (12Х18Н10Т). Герметичность получаемого соединения достигается здесь холодной сваркой материалов в локальной зоне на коническом или цилиндрическом участке втулки переходника.

Толщина стенки на длине концевой части трубчатой обоймы задавалась в диапазоне 1,0...1,5 мм. Это обусловлено необходимостью обеспечения высокой скорости деформации данного участка втулки – для образования биметаллического сварного соединения при магнитно-импульсном нагружении. Первоначальный радиальный зазор 0,75...1,5 мм между поверхностями втулки и вилки задавался исходя из необходимости начального

высокоскоростного разгона и последующего соударения стенки втулки с поверхностью вилки переходника при магнитно-импульсном нагружении.

Кинематика движения и соударения торцевой части втулки с поверхностью, для реализации процесса образования локальной зоны магнитно-импульсной сварки, помимо величины энергии разряда магнитно-импульсной установки определяется начальной формой эпюры импульсного давления магнитного поля на концевой участок втулки. Были рассмотрены две схемы реализации процесса образования зоны магнитно-импульсной сварки. Первая с использованием конических вилок биметаллического переходника, вторая – с применением цилиндрических вилок. Принципиальное отличие этих схем – направление движения точки (кольцевой линии) контакта при коническом соударении поверхностей, необходимым для протекания процесса образования локального участка магнитно-импульсной сварки соединяемых разнородных материалов.

Предварительные эксперименты показали, что исходя из геометрических параметров переходников (малая возможная длина зоны сварки), применение многovitковых индукторов не целесообразно из-за наличия у них заходной части спирали, создающей неоднородность эпюры магнитно-импульсного давления по периметру соединяемого участка переходника. Поэтому были разработаны и применены стальные одновитковые индукторы, обеспечивающие достаточный ресурс их работы при больших величинах импульсного давления, необходимого для реализации технологии магнитно-импульсной сварки

Как показали результаты компьютерного моделирования с использованием программного комплекса LS-DYNA, при использовании конической вилки биметаллического переходника, для обеспечения движения точки контакта от основания конуса вилки к его вершине необходима установка торца втулки вровень или с небольшим заглублением относительно рабочей зоны одновиткового индуктора.

При большом заглублении торца втулки относительно торца рабочей зоны индуктора происходит опережающее движение этого участка втулки и его быстрый контакт с поверхностью вилки. Это не обеспечивает последовательное однонаправленное движение точки контакта (от вершины конуса) и образование кумулятивной струи, необходимой для образования сварного соединения при высокоскоростном магнитно-импульсном нагружении.

При большой величине выступа торца втулки относительно торца рабочей зоны одновиткового индуктора деформирование втулки идет с образованием «хлыста» на торцевом участке, тормозящего радиальное движение оболочки втулки. Уменьшение радиальной скорости соударения поверхностей втулки и вилки и резкое падение скорости движения точки контакта также затрудняет процесс образования сварного соединения. Проведенные эксперименты и результаты компьютерного моделирования показали, что при такой схеме не удастся получить требуемую кинематику протекания деформационного процесса при угле конуса вилки равном

5°...7°. Это было обусловлено относительно невысокой рабочей частотой разрядного тока на магнитно-импульсной установке МИУ-50, которая была необходима для обеспечения требуемой величины энергии заряда. Увеличение угла конуса для выбранного размера вилки было практически невозможным, исходя из величины диаметра внутреннего проходного сечения образца переходника.

Поэтому основная часть экспериментальных исследований процесса магнитно-импульсной сварки биметаллического переходника была выполнена при использовании вилок с цилиндрической формой. При такой схеме процесса движение точки контакта вилки и втулки начинается от торца втулки. Необходимая кинематика деформационного процесса в этом случае задается при установке торца втулки по середине рабочей зоны индуктора.

Проведенные эксперименты показали, что при энергии заряда МИУ-50 в диапазоне 23,0...24,8 кДж это позволило получить качественное сварное соединение вилки и втулки биметаллического переходника, выбранного типоразмера, на длине 7...8 мм. На рисунке 1, в качестве примера, показан внешний вид одного из полученных образцов типового биметаллического (алюминий – нержавеющая сталь) переходника.

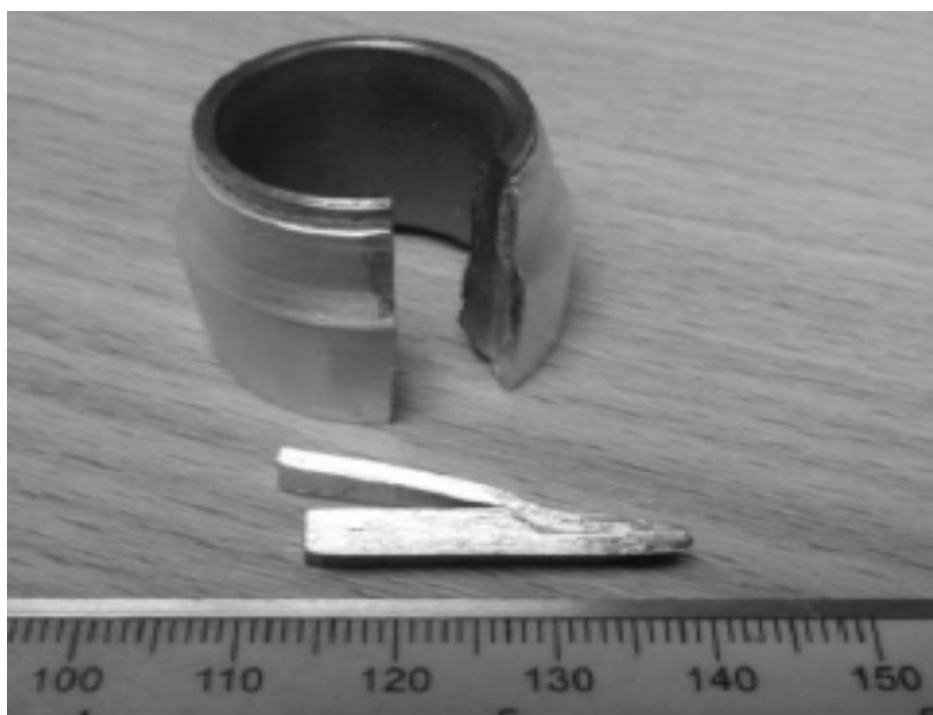


Рисунок 1 – Разрезанный образец биметаллического переходника, полученного магнитно-импульсной сваркой

С целью анализа состояния и структуры полученного сварного соединения «алюминий – нержавеющая сталь» был изготовлен макрошлиф вырезанного сегмента биметаллического переходника. Поведен анализ зоны сварки при 100-кратном увеличении (рисунок 2).

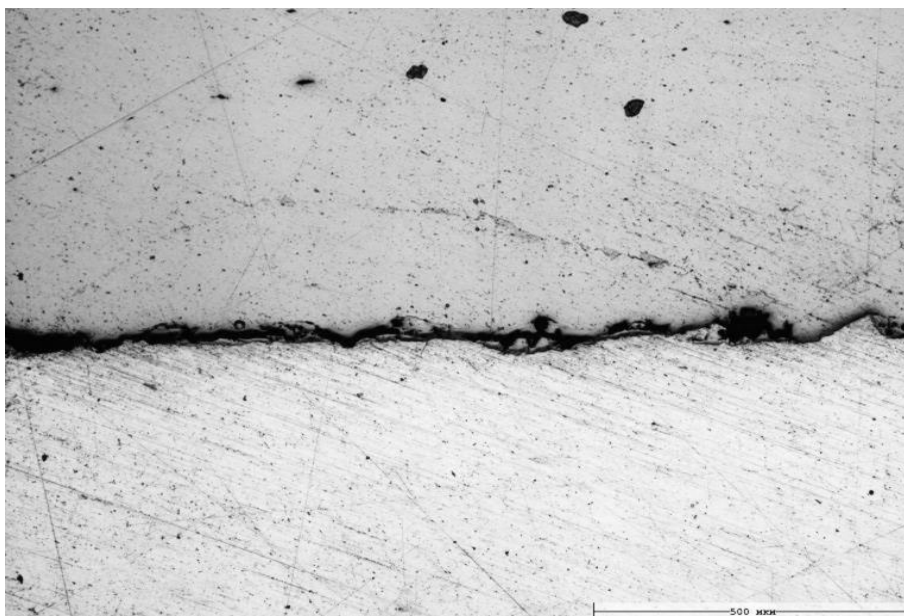


Рисунок 2 – Макроструктура соединения «АД31 – 12Х18Н10Т», в зоне магнитно-импульсной сварки (100)

Как видно (рисунок 2), профиль поверхности раздела соединения «АД31 – 12Х18Н10Т» полученного магнитно-импульсной сваркой, близок к квазиволновому или прямолинейному профилю. Это качественно соответствует результатам применения технологии сварки взрывом для аналогичных материалов. В работе [6] показано, что для «безволновой» границы соединения алюминия со сталью характерно минимальное количество хрупких оплавов, резко снижающих механическую прочность сварного соединения. На рисунке 2 также видно, что в переходной зоне после магнитно-импульсной сварки разнородных металлов наблюдается интенсивное перемешивание материалов и наличие в ней квазикристаллов. Данные рентгеновской дифракции для случая сварки взрывом [6] показывают, что такой слой состоит из алюминия и кристаллов интерметаллического соединения. Там же показано, что наличие алюминия в нем улучшает механические свойства слоя с закристаллизовавшимися расплавами и повышает качество сварки на границе раздела соединяемых металлов получаемого биметаллического переходника.

Список использованных источников

1. Магнитно-импульсная обработка материалов (МИОМ) / А.Б. Прокофьев, И.А. Беляева, В.А. Глуценков [и др.]. – Самара: АНО «Издательство Самарского Научного Центра», 2019. – 140 с. – EDN XLGSXF.
2. Конструкции сборочных соединений и магнитно-импульсная технология для их реализации / Д.Г. Черников, Р.Ю. Юсупов, В.И. Песоцкий, В.К. Алехина // Аэрокосмическая техника и технологии. – 2023. – Т. 1, № 3. – С. 173-182. – EDN FFZSNM.
3. Самохвалов, В.Н. Расчет параметров процесса сборки металлокомпозитных узлов давлением импульсного магнитного поля / В.Н. Самохвалов // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2016. – № 9. – С. 12-17. – EDN WXPTUZ.

4. Самохвалов, В.Н. Магнитно-импульсный метод получения прессуемых зажимов многопроволочных проводов контактной сети / В.Н. Самохвалов, Ж.В. Самохвалова, В.С. Целиковская // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2012. – № 3. – С. 53-57. – EDN PBEUJF.

5. Самохвалова, Ж.В. Исследование процесса магнитно-импульсной сборки проводов контактной подвески / Ж.В. Самохвалова, В.Л. Григорьев, В.Н. Самохвалов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2006. – № 3(23). – С. 25-30. – EDN JVYLZJ.

6. Оптимизация параметров сварки взрывом и структурные особенности композитов сталь – толстолистовой алюминий / Ю.П. Бесшапошников, Б.А. Гринберг, М.С. Пушкин [и др.] // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2022. – Т. 19, № 3. – С. 362-375. – EDN EHXQRE.

FORMING PERMANENT JOINTS OF PARTS FROM DISSIMILAR MATERIALS BY MAGNETIC-PULSE LOADING

Zh.V. Samokhvalova

*Volga Region State Transport University,
Samara, Russia*

The technological possibilities of producing a bimetallic aluminum-stainless steel joint using a pulsed magnetic field are examined. The influence of the magnetic-pulse loading process on the kinematics of the deformation process is analyzed. Magnetic-pulse loading schemes for joining dissimilar metals by creating a localized weld zone are determined.

Keywords: *pulsed magnetic field, dissimilar metals, welded joint*

УДК 621.98.044

ПРОБЛЕМЫ ПРИ ОБЖАТИИ ТРУБ МАЛОГО ДИАМЕТРА ДАВЛЕНИЕМ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Ж.В. Самохвалова

*Приволжский государственный университет путей сообщения,
г. Самара, Россия*

Представлены полученные результаты экспериментальных исследования технологических трудностей, возникающих при уменьшении сечения труб малого диаметра в условиях просачивания магнитного поля через стенку трубы. Проведен анализ влияния кумуляции поля при магнитно-импульсном нагружении на особенности обжатия трубчатых заготовок. Определены условия и технологические решения для исключения действия противодействия на деформационный процесс.

Ключевые слова: *магнитно-импульсная формовка, трубчатая заготовка, пережатие сечения.*

Применяемые в гидравлических и пневматических устройствах машин и технологической аппаратуры медные и алюминиевые трубопроводы

диаметром D менее 10 мм и толщиной стенки s более 1 мм относятся к толстостенным трубам: $D > 20s$ – критерий тонкостенной трубы. В этих условиях нельзя использовать упрощенные расчетные методики расчета давления, необходимого для обжатия трубчатой заготовки, поскольку нельзя пренебречь изменением тангенциальных напряжений по толщине стенки и нельзя не учитывать радиальные напряжения в ней. Поскольку здесь величина тангенциального и радиального напряжения имеют один порядок порядка, то они должны входить в расчётные формулы. При расчете параметров технологических процессов обжатия толстостенных труб необходимо использование методик расчёта напряжений и перемещений включающих как уравнения равновесия, так и уравнения совместности деформаций [1, 2].

В тоже время при толщине стенки 1,0....2,0 мм в операциях магнитно-импульсного обжима труб даже из материалов с высокой электропроводностью (медь, алюминий) проявляется диффузия магнитного поля во внутреннюю полость трубчатой заготовки. Это обусловлено тем, что такая толщина стенки сравнимой с глубиной скин-слоя в этих материалах при рабочих частотах разрядного тока промышленных магнитно-импульсных установок [3]. В этих условиях достаточно большая величина импульсного магнитного поля во внутренней полости трубчатой заготовки не только уменьшает результирующее давление, но и приводит к проявлению эффекта кумуляции магнитного поля, который обусловлен высокоскоростным уменьшением площади внутреннего сечения заготовки [5]. Это приводит к появлению дополнительного значительного по величине противодействия, противодействующего процессу обжатия трубчатой заготовки при действии давления импульсного магнитного поля (ИМП) со стороны индуктора.

При обжатии трубчатой заготовки малого диаметра импульсом давлением электромагнитного поля из-за большого уменьшения величины радиуса электромагнитной волны в глубине стенки, значение величины скин-слоя становится больше чем у плоской волны [5]. Вследствие этого в рассматриваемом случае обжима труб малого диаметра требуется учет дополнительного возрастания амплитудного значения напряженности просочившегося поля по сравнению с обжимом трубчатых заготовок большого диаметра, выполненных из того же электропроводного материала и при той же толщине стенки.

В технологических процессах обжатия труб малого диаметра давлением импульсного магнитного поля, плотность энергии поля проникшего во внутреннюю полость трубчатой заготовки, с учетом проявления магнитной кумуляции определяет величину амплитуды внутреннего противодействия, которое интенсивно препятствует деформированию по схеме на обжим. Амплитудная величина результирующего давления ИМП, деформирующего трубчатую заготовку, в этом случае определяется как [4]:

$$P \approx \frac{\mu_0}{2} H_0^2 \left(1 - \frac{\beta_K}{1 - ihR / \Delta_T^2} \right),$$

где μ_0 – магнитная постоянная, H_0 – амплитудное значение напряженности магнитного поля на поверхности трубы со стороны индуктора, h – толщина стенки трубы, R – радиус трубы, i – мнимая единица, μ_T – глубина скин-слоя в материале трубы с учетом увеличения плотности энергии магнитного поля вследствие уменьшения радиуса волны, μ_K – текущее значение коэффициента усиления напряженности просочившегося магнитного поля, обусловленного кумуляцией в процессе высокоскоростного обжатия.

Эффект действия большого противодействия наиболее будет наиболее интенсивен в процессах магнитно-импульсного смыкания проходного сечения трубчатой заготовки малого диаметра. По мере уменьшения внутреннего радиуса полости оболочки до нуля резко возрастающее противодействие будет препятствовать ее обжатию, даже при больших величинах рабочего давления со стороны индуктора [4].

В работе [6] получено условие остановки деформирования (обжатия) трубчатой заготовки давлением импульсного магнитного поля со стороны индуктора, из-за большой величины противодействия вследствие кумуляции магнитного поля во внутренней полости трубы:

$$(P_{MK} \cdot R_B^2 - P_{ИМП} \cdot R_H^2) \cdot r + 3(P_{MK} - P_{ИМП}) \cdot R_B^2 \cdot R_H^2 = 0,$$

где R_H – текущее значение наружного радиуса трубы в зоне обжатия; R_B – текущее значение внутреннего радиуса трубы в зоне обжатия; r – текущий радиус рассматриваемого слоя трубы; $P_{ИМП}$ – наружное деформирующее давление импульсного магнитного поля; P_{MK} – внутреннее противодействие вследствие кумуляции магнитного поля.

Решение этого уравнения для двух крайних случаев: $r=R_H$ и $r=R_B$ показало, что внутренняя стенка трубы при магнитно-импульсном обжиме, из-за кумуляции импульсного магнитного поля, тормозится при меньшей величине возникающего вследствие этого противодействия, чем внешняя стенка трубы. Поэтому продолжение обжатия трубы от действия внешнего давления $P_{ИМП}$ происходит за счет движения к центру наружной стенки трубчатой заготовки. Это протекает вследствие радиальной деформации (т.е. утонения стенки трубы) и возникновения большой осевой деформации трубчатой заготовки. Таким образом, возникает интенсивное удлинение трубчатой заготовки вследствие выдавливания ее материала из зоны обжима, подтвержденное результатами ниже изложенных экспериментальных исследований.

Экспериментальное исследование процесса обжима труб малого диаметра давлением импульсного магнитного поля в условиях его кумуляции во внутренней полости трубы было выполнено на трубчатых образцах, выполненных из сплава АД31Т, длиной 60 мм, диаметром 6 мм, с отверстием 3,3 мм.

Эксперименты проводились в НИЛ-41 Самарского университета на магнитно-импульсной установке МИУ-50. Была разработана и изготовле-

ны устройства: многовитковый индуктор с концентратором магнитного поля (рис. 1а), одновитковый индуктор (рис. 1б).

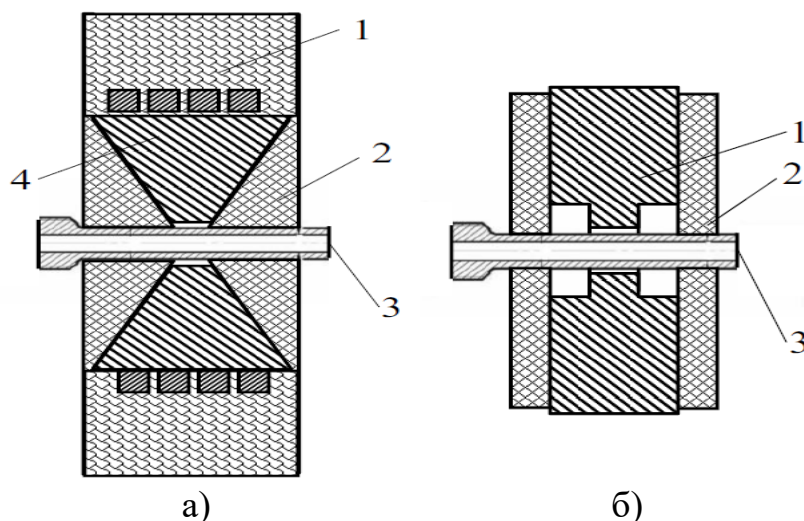


Рисунок 1 – Схемы устройств для магнитно-импульсного обжима трубочатых образцов малого диаметра:

а – многовитковый индуктор с концентратором, б – одновитковый индуктор:

1 – индуктор (многовитковый и одновитковый), 2 – фланец,

3 – трубочатый образец, 4 – концентратор магнитного поля

Это дало возможность за счет различной индуктивности этих индукторных систем, при равном диаметре рабочего отверстия 7 мм и одинаковой ширине токоведущей рабочей зоны этих устройств 12 мм, на одной установке варьировать величиной рабочей частоты импульсного тока и, соответственно, глубиной скин-слоя в заготовке.

При магнитно-импульсном обжиме трубочатых образцов при использовании устройства на основе многовиткового индуктора с концентратором магнитного поля рабочая частота разряда была 6,76 кГц. В этом случае глубина скин-слоя в АД31Т составляла 1,14 мм, при толщине стенки трубки 1,35 мм. Снижения величины давления импульсного магнитного поля в следствие простой диффузии во внутреннюю полость трубы при этом составляет менее 10%. Но экспериментально установлено, что даже такая небольшая величина диффузии магнитного поля резко влияет на возможности деформирования тонкостенных труб малого диаметра. Это обусловлено магнитной кумуляцией при высокоскоростном обжиме и возникновением интенсивного противодействия.

Действие внешнего деформирующего давления и противодействия изнутри оболочки создавало двухстороннее радиальное сжатие стенки трубы, которое как показали эксперименты превышает предел текучести материала трубочатого образца. При одновременном действии на стенки кольцевого рифта, образующегося при локальном обжатии трубочатого образца осевой составляющей давления со стороны индуктора, это вызывало

значительную осевую деформацию образцов в зоне обжата, образование шейки на трубчатом образце (рис. 2), или его разрыв с ростом энергии разряда. При этом не происходило полного пережатия внутренней полости трубчатого образца.



Рисунок 2

При магнитно-импульсном обжиге трубчатых образцов у устройстве с одновитковым индуктором рабочая частота разряда возросла до 28,6 кГц. Глубина скин-слоя в АД31Т уменьшилась до 0,55 мм. Вследствие этого напряженность просочившегося магнитного поля внутри трубы уменьшилась в 3,6 раза, а давление импульсного магнитного поля за счет его диффузии снизилось в 13,6 раза по сравнению с использованием многовиткового индуктора. Практическое полное предотвращение диффузии магнитного поля во внутреннюю полость трубчатого образца и, как следствие, резкое снижение эффекта кумуляции поля, позволило полностью пережимать внутреннюю полость и уменьшить осевое удлинение образцов при обжиге труб малого диаметра давлением импульсного магнитного поля.

Список использованных источников

1. Мкртычев, О. В. Задача Ламе о деформации трубы под действием внутреннего и внешнего давления / О. В. Мкртычев // Вестник Новороссийского филиала Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. Серия: механика и математика. – 2021. – Т. 1, № 1(1). – С. 32-36. – EDN ESGNSH.
2. Мешков, И. Н. Электромагнитное поле. Часть 1. Электричество и магнетизм / И. Н. Мешков, Б. В. Чириков. – Москва, Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, 2014. – 544 с. – EDN UGNXHP.
3. Черников, Д. Г. Исследование процесса магнитно-импульсной формовки с учетом эффекта просачивания магнитного поля сквозь заготовку / Д. Г. Черников, В. Ф. Карпухин, В. А. Глуценков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2020. – Т. 22, № 2(94). – С. 75-80. – EDN SANUGI.
4. Влияние эффекта диффузии и кумуляции поля на магнитно-импульсный обжим труб малого диаметра / В. Н. Самохвалов, Д. Г. Черников, Ж. В. Самохва-

лова [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2025. – Т. 27, № 2(124). – С. 116-123. – EDN HQKMUY.

5. Шапиро, Д. Н. Электромагнитное экранирование. – Долгопрудный: ИД «Интеллект». 2010. – 120 с.

6. Технологические особенности магнитно-импульсного обжима толстостенных труб малого диаметра / В. Н. Самохвалов, Д. Г. Черников, Н. В. Самохвалов, Ж. В. Самохвалова // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2025. – № 10. – С. 18-23. – EDN GJEMCS.

PROBLEMS IN SMALL-DIAMETER PIPES CRAMPING WITH PULSED MAGNETIC FIELD PRESSURE

Zh.V. Samokhvalova

*Volga Region State Transport University,
Samara, Russia*

The article presents the results of an experimental study of process difficulties arising when reducing the cross-section of small-diameter pipes under conditions of magnetic field leakage through the pipe wall. The effect of field cumulation under magnetic pulse loading on the crimping characteristics of tubular blanks is analyzed. Conditions and process solutions for eliminating the effect of backpressure on the deformation process are determined.

Keywords: magnetic pulse forming, tubular blank, cross-section crimping.

УДК 631.15.01

МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ

С.В. Сарафанов, В.В. Максимов

*Казанский государственный энергетический университет,
Казань, Россия*

В статье представлен систематический анализ методов управления электродвигателями постоянного и переменного тока. Рассмотрены традиционные способы регулирования – реостатный, релейно-контакторный, изменение напряжения и магнитного потока – а также современные методы, включая широтно-импульсную модуляцию (ШИМ), частотное регулирование с использованием преобразователей частоты, скалярное и векторное управление. Особое внимание уделено интеллектуальным системам управления на основе ПИД-регуляторов.

Ключевые слова: управление электродвигателем, асинхронный двигатель, двигатель постоянного тока, частотный преобразователь, широтно-импульсная модуляция, скалярное управление, векторное управление, ПИД-регулятор.

Электродвигатели являются основой современной промышленности, потребляя порядка 70% всей вырабатываемой электроэнергии. Эффективность их работы напрямую зависит от качества системы управления, кото-

рая обеспечивает не только пуск и остановку, но и регулирование скорости, момента, положения вала, а также защиту оборудования от аварийных режимов. Современные методы управления электродвигателями прошли длительный путь эволюции – от простейших релейно-контакторных схем до сложных цифровых систем с элементами искусственного интеллекта. В данной статье рассматриваются основные способы управления двигателями постоянного и переменного тока, их преимущества, недостатки и области применения.

По степени автоматизации системы управления электроприводами делятся на три категории. Ручное управление предполагает, что оператор самостоятельно контролирует все рабочие процессы, непосредственно воздействуя на механизмы электропривода. Такие системы отличаются низкой точностью и медлительностью, поэтому применяются редко – в основном для выполнения базовых операций. Полуавтоматические системы сводят присутствие оператора к минимуму – он лишь воздействует на автоматические системы управления, причем контроль может осуществляться дистанционно. Такие системы обеспечивают более высокое быстродействие и точность. Автоматические системы не допускают участия оператора – все процессы контроля и регулировки осуществляются в автономном режиме согласно заложенной программе и с учетом внештатных ситуаций.

По функциональному назначению системы управления обеспечивают: пуск и выключение двигателя, регулирование скорости, управление положением механизма, контроль и изменение характеристик устройства в соответствии с заданными параметрами, а также защиту, блокировку и сигнализацию.

Двигатели постоянного тока (ДПТ), несмотря на снижение их доли в промышленности, продолжают применяться в тех областях, где требуется высокий пусковой момент и широкий диапазон регулирования скорости. Существует три основных способа управления скоростью ДПТ.

Первый способ – изменение напряжения питания. Этот метод считается наиболее эффективным и экономичным, так как обеспечивает широкий диапазон регулирования (до 1:100) и лучшие энергетические характеристики. Управление осуществляется плавно, с высокой точностью, без потерь мощности в силовой цепи. Современные тиристорные и транзисторные преобразователи позволяют реализовать этот метод наиболее эффективно.

Второй способ – введение добавочного сопротивления в цепь якоря (реостатное регулирование). Этот метод заключается в последовательном включении регулировочного реостата. Однако он не получил широкого распространения из-за неэкономичности: значительная часть энергии теряется в виде тепла на реостате, а механические характеристики получаются «мягкими» – скорость сильно зависит от нагрузки.

Третий способ – изменение магнитного потока (регулирование возбуждением). Для двигателей с электромагнитным возбуждением путем изме-

нения тока в обмотке возбуждения можно ослаблять магнитный поток, что приводит к увеличению скорости вращения. Этот способ экономичен, поскольку управляется малый ток возбуждения, однако он позволяет только увеличивать скорость относительно номинальной (до 1:4) и имеет ограничения по механической прочности машины.

С появлением мощных полевых транзисторов наиболее популярными стали регуляторы оборотов двигателя постоянного тока с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Принцип ШИМ заключается в подаче на двигатель не постоянного напряжения, а последовательности импульсов с регулируемой скважностью. Среднее напряжение на двигателе пропорционально отношению длительности импульса к периоду следования. Благодаря высокой частоте переключения (десятки килогерц) пульсации тока сглаживаются индуктивностью обмоток, и двигатель работает практически как при постоянном питании. ШИМ-регуляторы обеспечивают высокий КПД (до 95%), плавное регулирование в широком диапазоне и малые габариты.

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором являются наиболее распространенными в промышленности благодаря простоте конструкции, надежности и низкой стоимости. Однако регулирование их скорости традиционными методами сопряжено с определенными трудностями.

Наиболее эффективным и универсальным способом управления асинхронным двигателем является частотное регулирование. Изменяя частоту питающего напряжения, можно изменять угловую скорость магнитного поля статора, а, следовательно, и скорость ротора. При этом для сохранения нормального коэффициента мощности и допустимости перегрузок при изменении частоты необходимо одновременно изменять и величину питающего напряжения по определенному закону.

Частотные преобразователи (ЧП) делятся на два основных типа. Преобразователи с непосредственной связью (без промежуточного звена постоянного тока) представляют собой управляемые выпрямители на тиристорах. Их недостатки: невозможность повышения выходной частоты выше частоты сети (максимум 30 Гц), значительная несинусоидальность выходного напряжения. Преимущества: высокий КПД (до 99%) и относительно низкая стоимость.

Наибольшее распространение получили преобразователи с явно выраженным звеном постоянного тока. В них входное переменное напряжение сначала выпрямляется и сглаживается, а затем инвертор (управляемый транзисторный мост) преобразует постоянное напряжение обратно в переменное с требуемой частотой и амплитудой. Такая схема обеспечивает широкий диапазон регулирования (до 1:100), хорошую форму выходного напряжения и возможность работы с обратной связью.

Внедрение частотного регулирования позволяет существенно экономить электроэнергию, так как во многих механизмах (насосы, вентиляторы, компрессоры) максимальная мощность используется лишь 10-20% времени. Например, при использовании дросселирования для регулирова-

ния производительности насоса возникают гидроудары и значительные пусковые токи. Частотный привод позволяет гибко подстраиваться под текущий расход, автоматизировать процесс и снизить затраты на электроэнергию на 30-50%.

В современных системах управления электроприводами все большее применение находят интеллектуальные методы. В статье, опубликованной в журнале «Вестник компьютерных и информационных технологий» (№7, 2025), проведен детальный сравнительный анализ пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулирования и нечеткого логического управления (FLC).

ПИД-регуляторы, основанные на линейной минимизации ошибки, обеспечивают простоту и точность в стабильных системах, но испытывают трудности при работе с нелинейностями и внешними возмущениями. ПИД-управление идеально подходит для детерминированных задач, например, для станков с ЧПУ.

Нечеткое логическое управление, использующее эвристический вывод на основе правил, адаптируется к нелинейной динамике без необходимости в точной математической модели. Однако FLC требует значительных вычислительных ресурсов и сложной настройки базы правил. Нечеткая логика превосходно работает в динамических средах, таких как робототехника.

В 2025 году в журнале «Интеллектуальные технологии на транспорте» была опубликована статья, посвященная разработке системы векторного управления асинхронным двигателем с оптронным датчиком-формирователем алгоритма. Авторы предложили способ управления частотным преобразователем, основанный на прямом векторном управлении от оптронного датчика, жестко связанного с ротором двигателя. Такой подход задает постоянное скольжение и определяет алгоритм работы ключей инвертора во всем диапазоне регулирования. Экспериментальные исследования подтвердили работоспособность предложенного способа в широком диапазоне скоростей и нагрузок, показав линейную зависимость скорости от напряжения на входе инвертора.

Таким образом, методы управления электродвигателями прошли длительный путь эволюции – от простых релейно-контакторных схем до сложных цифровых систем с элементами искусственного интеллекта. Для двигателей постоянного тока наиболее эффективным методом является ШИМ-регулирование с использованием транзисторных преобразователей, обеспечивающее высокий КПД и широкий диапазон регулирования. Для асинхронных двигателей основным и наиболее универсальным методом стало частотное регулирование с векторным управлением, позволяющее достичь характеристик, сравнимых с лучшими системами постоянного тока.

Список использованных источников

1. Омельченко Е.Я., Лымарь А.Б., Линьков С.А. Системы управления электроприводами: учебное пособие. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорского ГТУ, 2023. – 320 с.

2. Терехов О.И., Окунева В.В. Методы управления асинхронными электродвигателями. – Тверской государственный технический университет, 2023.
3. Ахмад З. Сравнение автоматизированных интеллектуальных систем управления электроприводами // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2025. – № 7. – С. 32-42.
4. Петров П.А., Колпахчян П.Г., Марикин А.Н. и др. Векторное управление асинхронным двигателем с оптронным датчиком-формирователем алгоритма // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2025. – С. 667-675.
5. Евсиков А.А., Коковин В.А., Леонов А.П. Автоматизированный электропривод с частотным управлением: учебное пособие. – Дубна: Гос. ун-т «Дубна», 2020. – 121 с.

ELECTRIC MOTOR CONTROL METHODS

S.V. Sarafanov, V.V. Maksimov

*Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia*

The article presents a systematic analysis of control methods for DC and AC electric motors. Traditional control methods – rheostatic, relay-contactor, voltage and magnetic flux variation – are considered, as well as modern methods including pulse-width modulation (PWM), frequency control using variable frequency drives, scalar and vector control. Special attention is paid to intelligent control systems based on PID controllers.

Keywords: *electric motor control, induction motor, DC motor, variable frequency drive, pulse-width modulation, scalar control, vector control, PID controller.*

УДК 004.056.53

АВТОМАТИЗАЦИЯ ВЕРИФИКАЦИИ ОБНОВЛЕНИЙ ПРОГРАММНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ В DEVSECOPS-КОНВЕЙЕРЕ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Е.Н. Секретарева, А.А. Бесчастнов

*Научно-технологический университет «Сириус»,
федеральная территория «Сириус», Россия*

Рассмотрена проблема обеспечения безопасности цепочки поставок программного обеспечения в условиях перехода к микросервисным и облачно-ориентированным архитектурам. Проанализирован ландшафт киберугроз, связанных с компрометацией обновлений зависимостей. Рассмотрены инструменты методологии DevSecOps и нормативные требования Российской Федерации к верификации обновлений на значимых объектах критической информационной инфраструктуры. Сформулирована задача разработки формальной модели принятия решения о допустимости обновления.

Ключевые слова: *цепочка поставок программного обеспечения, DevSecOps, верификация обновлений, критическая информационная инфраструктура, программные зависимости, CI/CD, ФСТЭК.*

Архитектурная трансформация программных систем – переход от монолитов к распределённым микросервисным и облачно-ориентированным решениям – сопровождается ростом числа сторонних компонентов и автоматизированных процессов поставки [4, 5ENISA]. Это расширяет поверхность атаки и повышает значимость проблемы безопасности цепочки поставок программного обеспечения [1]. Особенностью атак данного класса является то, что вредоносный код доставляется через легитимный канал обновлений и не обнаруживается традиционными средствами периметровой защиты [13]. Для объектов критической информационной инфраструктуры (КИИ) Российской Федерации это формирует потребность в верификации обновлений до их установки в производственную среду.

Микросервис представляет собой целостный независимый процесс, взаимодействующий с другими посредством обмена сообщениями; приложения такой архитектуры могут включать сотни сервисов, разрабатываемых и развёртываемых независимо [4, 5]. Цепочка поставок программного обеспечения охватывает совокупность людей, компонентов, библиотек и процессов, влияющих на разработку и эксплуатацию продукта. Поэтому риски кибербезопасности могут возникать на любом этапе её жизненного цикла [1, 2].

Анализ отчётов 2024–2026 гг. позволяет выделить три устойчивых класса угроз. По данным ENISA, эксплуатация уязвимостей составляет 21,3% зафиксированных векторов вторжения, причём 68 % инцидентов этого класса приводят к развёртыванию вредоносного кода [7]. Уязвимые версии библиотек продолжают использоваться даже при наличии исправленных релизов – характерным примером служит Log4j [6]. Отдельным вектором являются вредоносные обновления изначально легитимных пакетов: примерами служат aiocpa, @0xengine/xmlrpc и @solana/web3.js [8], а резонансные инциденты SolarWinds (2020), node-ipc (2022) и xz (2024) сделали этот класс атак широко известным [13]. Атаки также всё чаще ориентируются на учётные данные, секреты CI и среды сборки [6].

Часть угроз поддаётся обнаружению на инфраструктурном уровне, тогда как угрозы, реализуемые через легитимный канал обновлений, требуют встраивания механизмов контроля непосредственно в процесс разработки и поставки.

Методология DevSecOps определяется как интеграция практик безопасности в конвейер непрерывной интеграции и поставки, реализуемая посредством автоматизации контроля на каждом этапе цикла разработки в соответствии с принципом shift-left [9, 11]. Соответствующие виды проверок распределены по этапам жизненного цикла обновления (таблица 1).

Эмпирические данные показывают, что степень автоматизации проверок неравномерна и убывает от этапа сборки к этапу развёртывания [10, 12]. Так, 62 % организаций применяют средства SCA, однако лишь 12 % выполняют проверки безопасности при каждом коммите [10]. При этом половина организаций начинает использовать новые версии сторонних библиотек в течение одного дня после их публикации, что само по себе

создаёт риск: быстрое принятие версии без верификации может оказаться опаснее отложенного обновления [6, 13].

Таблица 1 – Виды проверок DevSecOps
по этапам жизненного цикла обновления

Этап	Вид проверки
Сборка	SAST, SCA, формирование SBOM
Тестирование	DAST, фаззинг API
Публикация	Подпись артефакта, сканирование образа
Развёртывание	Верификация при развёртывании

Сравнительный анализ восьми представителей различных классов DevSecOps-решений: GitLab Ultimate, Snyk, JFrog Xray, Sigstore/Cosign, PT Application Inspector, Solar appScreener, Kaspersky Container Security, CodeScoring показывает, что при различиях в функциональном покрытии у всех рассмотренных решений обнаруживается общее свойство: итоговое решение о допустимости обновления формируется как агрегат отдельных проверок. Оно либо принимается неявно при успешном прохождении настроенных правил, либо складывается из набора отчётов, передаваемых специалисту для экспертного рассмотрения. Формализованной процедуры, объединяющей результаты разнородных проверок в единый детерминированный вердикт с воспроизводимым обоснованием, среди рассмотренных решений не обнаружено. Этот вывод согласуется с систематическими обзорами литературы, констатирующими, что комплексная верификация обновлений остаётся недостаточно формализованной областью [14, 15].

Функционирование программных систем в контуре КИИ регулируется Федеральным законом № 187-ФЗ [16]. Требования к безопасности значимых объектов КИИ конкретизированы в приказах ФСТЭК России от 25.12.2017 № 239 [17], от 20.02.2020 № 35 [18] и от 14.03.2014 № 31 [19], предусматривающих управление обновлениями программного обеспечения, статический анализ исходного кода, фаззинг-тестирование, контроль целостности и подлинности поставляемых компонентов, а также формирование модели угроз.

Инструментальная основа реализации этих требований определена Методикой тестирования обновлений безопасности программных и программно-аппаратных средств, утверждённой ФСТЭК России в 2022 г [20]. Методика устанавливает шесть обязательных тестов, образующих последовательный контур проверки кандидатного обновления: T001 – сверка идентичности путем сравнение контрольных сумм из разных источников; T002 – проверка подлинности электронной цифровой подписи; T003 – антивирусный контроль не менее двух антивирусных средств разных разработчиков; T004 – поиск опасных конструкций с применением индикаторов компрометации и YARA-правил; T005 – мониторинг активности обновлённого средства в тестовой среде; T006 – ручной анализ при обнаружении признаков недеklarированных возможностей. По ре-

зультатам тестов оператор информационной системы принимает одно из трёх решений: обновление безопасно и может быть установлено; может быть установлено при определённых ограничениях; устанавливать не рекомендуется.

Ключевым принципом Методики является разграничение ответственности: тестирование выполняется специалистом по защите информации, а решение об установке принимается оператором с учётом результатов тестирования и оценки рисков. Тем самым нормативно закрепляется граница контура допуска обновления.

Архитектурная трансформация программных систем сопровождается расширением поверхности атаки и повышением значимости безопасности цепочки поставок. Атаки через легитимный канал обновлений зависимостей выделяются невозможностью их обнаружения средствами периметровой защиты, что обуславливает необходимость встраивания механизмов контроля непосредственно в процесс разработки и поставки. Существующие инструменты DevSecOps обеспечивают покрытие отдельных видов проверок, однако формализованного механизма агрегации результатов в единый детерминированный вердикт о допустимости обновления среди рассмотренных решений не обнаружено. Нормативная база Российской Федерации применительно к объектам КИИ предписывает обязательность верификации обновлений и определяет конкретный набор тестов T001–T006 и трёхзначный вердикт оператора как итог процесса. Из этого следует задача разработки формальной модели принятия решения о допустимости кандидатного обновления программной зависимости, реализующей требования Методики ФСТЭК 2022 в составе DevSecOps-конвейера для объектов КИИ.

Список использованных источников

1. National Institute of Standards and Technology. Cybersecurity Supply Chain Risk Management Practices for Systems and Organizations : NIST SP 800-161r1. – Gaithersburg: NIST, 2022. – URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.800-161r1.pdf> (дата обращения: 18.03.2026). – Текст: электронный.
2. Red Hat. Software Supply Chain Security. – Red Hat, 2023. – URL: <https://www.redhat.com/en/resources/software-supply-chain-security-ebook> (дата обращения: 18.03.2026). – Текст: электронный.
3. Waseem M., Liang P., Shahin M. Container Security: Issues, Challenges, and the Road Ahead // arXiv. – 2020. – URL: <https://arxiv.org/abs/2008.07729> (дата обращения: 18.03.2026). – Текст: электронный.
4. Dragoni N., Giallorenzo S., Lluch Lafuente A., Mazzara M., Montesi F., Mustafin R., Safina L. Microservices: Yesterday, Today, and Tomorrow // arXiv. – 2017. – URL: <https://arxiv.org/abs/1606.04036> (дата обращения: 18.03.2026). – Текст: электронный.
5. Deng S., Zhao H., Huang B., Zhang C., Chen F., Deng Y., Yin J., Dustdar S., Zomaya A. Y. Cloud-Native Computing: A Survey From the Perspective of Services // Proceedings of the IEEE. – 2024. – DOI: 10.1109/JPROC.2024.3351239.

6. Sonatype. State of the Software Supply Chain. – URL: <https://www.sonatype.com/state-of-the-software-supply-chain/introduction> (дата обращения: 18.03.2026). – Текст : электронный.
7. ENISA. Threat Landscape 2025. – URL: https://www.enisa.europa.eu/sites/default/files/2026-01/ENISA%20Threat%20Landscape%202025_v1.2.pdf (дата обращения: 18.03.2026). – Текст : электронный.
8. National Technology Security Coalition. The 2025 Software Supply Chain Security Report. – 2025. – URL: <https://ntsc.org/wp-content/uploads/2025/03/The-2025-Software-Supply-Chain-Security-Report-RL-compressed.pdf> (дата обращения: 18.03.2026). – Текст: электронный.
9. Myrbakken H., Colomo-Palacios R. DevSecOps: A Multivocal Literature Review // Lecture Notes in Computer Science. – 2017. – Vol. 10695. – P. 17–29. – DOI: 10.1007/978-3-319-75677-6_2.
10. Cheenepalli J., Hastings J. D., Ahmed K. M., Fenner C. Advancing DevSecOps in SMEs: Challenges and Best Practices for Secure CI/CD Pipelines // arXiv. – 2025. – arXiv:2503.22612. – URL: <https://arxiv.org/abs/2503.22612> (дата обращения: 15.04.2026). – Текст: электронный.
11. Prates L., Pereira R. DevSecOps practices and tools // International Journal of Information Security. – 2025. – Vol. 24. – Article 11. – DOI: 10.1007/s10207-024-00914-z.
12. Rajapakse R. N., Zahedi M., Babar M. A., Shen H. Challenges and solutions when adopting DevSecOps: A systematic review // Information and Software Technology. – 2022. – Vol. 141. – Article 106700. – DOI: 10.1016/j.infsof.2021. 106700.
13. He Z., Kula R. G., Sarro F. Pinning Is Futile: How Coordinated Dependency Management Can Help Reduce Ecosystem-Wide Supply Chain Risk // arXiv. – 2025. – arXiv:2502.06662. – URL: <https://arxiv.org/abs/2502.06662> (дата обращения: 15.04.2026). – Текст: электронный.
14. Gokkaya B. et al. Software supply chain: review of attacks, risk assessment strategies and security controls // arXiv. – 2023. – arXiv:2305.14157. – URL: <https://arxiv.org/abs/2305.14157> (дата обращения: 15.04.2026). – Текст: электронный.
15. Reichert L., Obelheiro R. Software supply chain security: a systematic literature review // International Journal of Computers and Applications. – 2024. – Vol. 46, № 10. – P. 853–867. – DOI: 10.1080/1206212X.2024.2390978.
16. О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации : федер. закон от 26.07.2017 № 187-ФЗ : (с изм. и доп. 2025 г.).
17. Об утверждении Требований по обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации : приказ ФСТЭК России от 25.12.2017 № 239.
18. О внесении изменений в Требования по обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации : приказ ФСТЭК России от 20.02.2020 № 35 : (с изм. 2024 г.).
19. Об утверждении требований к защите информации в автоматизированных системах управления : приказ ФСТЭК России от 14.03.2014 № 31.
20. Методика тестирования обновлений безопасности программных, программно-аппаратных средств: утв. ФСТЭК России 28.10.2022.

AUTOMATION OF SOFTWARE DEPENDENCY UPDATE VERIFICATION IN A DEVSECOPS PIPELINE FOR CRITICAL INFORMATION INFRASTRUCTURE OBJECTS

E.N. Secretareva, A. A. Beschastnov

*Sirius University of Science and Technology,
Sirius, Russia*

The paper addresses software supply chain security in the context of the transition from monolithic to microservice and cloud-native architectures. Current cyber threats associated with the compromise of dependency updates are analyzed. DevSecOps tools and the regulatory requirements of the Russian Federation for update verification at significant critical information infrastructure objects are examined. The task of developing a formal decision-making model on update admissibility is formulated.

Keywords: software supply chain, DevSecOps, update verification, critical information infrastructure, software dependencies, CI/CD, FSTEC.

УДК 658.5:004

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Н.А. Сергеев¹, С.Е. Воропаев²

¹Донской государственный аграрный университет, п. Персиановский, Россия

²ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург, Россия

Статья посвящена анализу роли автоматизации производственных процессов в контексте цифровой трансформации промышленных предприятий. Рассматриваются технологические решения, обеспечивающие переход от традиционных производственных схем к цифровым. Исследуются организационные и экономические условия успешного внедрения автоматизированных систем. Обосновывается связь между уровнем автоматизации и конкурентоспособностью предприятия на современных рынках.

Ключевые слова: автоматизация производства, цифровая трансформация, промышленность, производственные процессы, технологическое развитие, промышленный интернет вещей.

Цифровая трансформация промышленности меняет содержание понятия «автоматизация». Традиционно автоматизация означала замену ручного труда механическими или электронными устройствами с жёстко заданным алгоритмом работы. Цифровая трансформация добавляет к этому новое измерение: оборудование не только выполняет операции, но и собирает данные, анализирует их в реальном времени и адаптирует свои действия к изменяющимся условиям. Это принципиальное отличие определяет новые требования к проектированию производственных систем [1].

Промышленный интернет вещей образует технологическую основу современной автоматизации. Датчики, встроенные в оборудование, непрерывно передают данные о температуре, вибрации, давлении, токе и других параметрах в единую систему мониторинга. Обработка этих данных позволяет перейти от планово-предупредительного обслуживания оборудования к прогностическому: ремонт выполняется не по расписанию, а в момент, когда данные сигнализируют о нарастающей неисправности. Предприятия, внедрившие прогностическое обслуживание, сокращают незапланированные простои оборудования на 30-50% [2].

Роботизация производственных операций является наиболее заметным компонентом автоматизации. Коллаборативные роботы, способные работать непосредственно рядом с людьми без защитных ограждений, резко снизили порог входа для малых и средних предприятий. Если промышленный робот первого поколения требовал изолированной рабочей зоны, специализированного программирования и значительных капитальных вложений, то современный коллаборативный робот программируется методом обучения движению и окупается за 12-18 месяцев при двухсменном режиме работы. Это делает роботизацию доступной для предприятий с небольшими объёмами производства и широкой номенклатурой изделий [3].

Автоматизированные системы управления производством обеспечивают координацию между отдельными единицами оборудования и производственными участками. Системы класса MES осуществляют диспетчеризацию производственных заданий, отслеживают движение материалов и незавершённого производства, фиксируют фактические параметры выполнения операций. Данные MES-системы служат основой для анализа производительности, выявления потерь и оперативной корректировки производственной программы. Интеграция MES с ERP-системой обеспечивает замкнутый контур управления от заказа клиента до отгрузки готовой продукции [4].

Цифровая трансформация меняет требования к производственному персоналу. Оператор автоматизированной линии управляет не операцией, а системой: контролирует показатели на экране, реагирует на аварийные сигналы, вводит параметры переналадки. Это требует иного набора компетенций по сравнению с оператором традиционного оборудования. Промышленные предприятия сталкиваются с дефицитом специалистов, способных работать с цифровыми производственными системами, и вынуждены инвестировать в переподготовку персонала параллельно с внедрением новых технологий.

Экономическая эффективность автоматизации определяется не только прямым снижением трудозатрат. Автоматизированные системы обеспечивают стабильность параметров производственного процесса, которую невозможно достичь при ручном труде. Это снижает долю дефектной продукции, уменьшает расход материалов на гарантийное обслуживание и рекламации, повышает повторяемость изделий. В серийном производстве точных изделий снижение доли дефекта на один

процентный пункт эквивалентно по экономическому эффекту снижению трудоёмкости на 5-7%.

Внедрение автоматизации сопряжено с организационными рисками, которые часто недооцениваются. Технология может быть выбрана корректно, а оборудование установлено в соответствии с проектом, но при этом производительность системы окажется ниже расчётной из-за сопротивления персонала, неотработанных процедур переналадки или слабой интеграции с системой планирования. Предприятия, которые уделяют организационной подготовке столько же внимания, сколько техническому проектированию, достигают плановых показателей производительности в среднем на 6-8 месяцев быстрее.

Выбор глубины автоматизации для конкретного производственного процесса требует экономического анализа. Полная автоматизация оправдана при высоких объёмах выпуска, стабильной номенклатуре и жёстких требованиях к повторяемости параметров изделия. При широкой номенклатуре и частых переналадках более эффективна частичная автоматизация с сохранением гибких ручных операций. Избыточная автоматизация снижает гибкость производства и увеличивает сроки переналадки, что в условиях индивидуального и мелкосерийного производства оборачивается экономическими потерями [5].

Цифровая трансформация производства продолжается, и предприятия находятся на разных этапах этого пути. Стратегически важно не копировать технологические решения конкурентов, а выстраивать автоматизацию исходя из собственной производственной стратегии, структуры затрат и компетенций персонала. Автоматизация, органично встроенная в производственную систему предприятия, создаёт устойчивое конкурентное преимущество. Автоматизация, внедрённая ради соответствия модным трендам, превращается в источник дополнительных затрат.

Список использованных источников

1. Бунчиков, О.Н. Управление человеческими ресурсами в эпоху цифровой трансформации / О.Н. Бунчиков, А.А. Сергеев, М.А. Донец // Инициативы молодых – науке и производству: Сборник статей VI Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и студентов, Пенза, 29–30 ноября 2023 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2023. – С. 168-172.

2. Бунчиков, О.Н. Управление бизнес-процессами: оптимизация и автоматизация для повышения эффективности / О.Н. Бунчиков, А.А. Сергеев, М.А. Донец // Инициативы молодых – науке и производству : Сборник статей VI Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и студентов, Пенза, 29–30 ноября 2023 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2023. – С. 163-167.

3. Цифровая экономика: суть, характеристика цифрового общества, тенденции и проблемы развития / А.А. Сергеев, Т.Ю. Животова, М.В. Носова [и др.] // Проблемы социально-экономической устойчивости региона: Сборник статей XX Международной научно-практической конференции, Пенза, 25–26 января 2023

года / Под редакцией Г.А. Резник. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2023. – С. 419-422.

4. Использование цифровых технологий в финансовой сфере / Н.А. Бородина, Е.В. Гракушин, А.А. Сергеев, Е.Р. Раилян // Стратегическое развитие инновационного потенциала отраслей, комплексов и организаций : сборник статей X Международной научно-практической конференции, Пенза, 20–21 октября 2022 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2022. – С. 35-38.

5. Современный подход к изучению облачных технологий необходимых для развития цифровой экономики / Н.А. Бородина, Е.В. Гракушин, А.А. Сергеев, Е.Р. Раилян // Наука, образование и бизнес: новый взгляд или стратегия интеграционного взаимодействия : Сборник научных трудов по материалам II Международной научно-практической конференции, Нальчик, 20–22 октября 2022 года. Том Часть 1. – Нальчик: Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова, 2022. – С. 29-32.

AUTOMATION OF PRODUCTION PROCESSES IN THE CONTEXT OF DIGITAL TRANSFORMATION OF INDUSTRY

N.A. Sergeev¹, S.E. Voropaev²

¹Don State Agrarian University, P. Persianovsky, Russia

²Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint-Petersburg, Russia

The article analyzes the role of automation of production processes in the context of digital transformation of industrial enterprises. Technological solutions that ensure the transition from traditional production schemes to digital ones are considered. The article explores the organizational and economic conditions for the successful implementation of automated systems. The relationship between the level of automation and the competitiveness of an enterprise in modern markets is substantiated.

Keywords: *production automation, digital transformation, industry, production processes, technological development, industrial Internet of Things.*

УДК 658.512:004.9

КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ ПРОДУКЦИИ

Н.А. Сергеев¹, С.Е. Воропаев²

¹Донской государственный аграрный университет, п. Персиановский, Россия

²ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург, Россия

В статье исследуется роль систем компьютерного проектирования технологических процессов в формировании конкурентных преимуществ промышленных предприятий. Анализируются функциональные возможности современных CAD/CAM/CAE-систем и их практическое применение в технологической подготовке производства. Оценивается влияние сокращения сроков проектирования на рыночную позицию предприятия. Рассматриваются условия, при которых цифровые инструменты проектирования реализуют свой потенциал в полной мере.

Ключевые слова: компьютерное проектирование, технологические процессы, конкурентоспособность продукции, CAD/CAM, технологическая подготовка производства, цифровой двойник.

Конкурентоспособность продукции определяется соотношением цены, качества и срока поставки. Компьютерное проектирование технологических процессов влияет на все три составляющие. Оно сокращает время технологической подготовки производства, снижает вероятность ошибок при проектировании оснастки и инструмента, позволяет оптимизировать технологические режимы до начала физического производства. Предприятия, системно применяющие компьютерное проектирование, выводят новые изделия на рынок на 25-40% быстрее конкурентов, опирающихся на традиционные методы проектирования [1].

CAD-системы автоматизируют создание конструкторской документации и обеспечивают трёхмерное параметрическое моделирование изделий. Изменение одного параметра автоматически пересчитывает все связанные размеры и обновляет ассоциированные чертежи и спецификации. Это устраняет значительную долю ошибок, которые при традиционном черчении возникают при внесении изменений в конструкцию и требуют ручной корректировки всей документации. Параметрическая модель изделия служит единым источником данных для всех последующих этапов технологической подготовки.

CAM-системы формируют управляющие программы для станков с числовым программным управлением непосредственно на основе трёхмерной модели изделия. Технолог задаёт стратегию обработки, тип инструмента и режимы резания, а система автоматически строит траекторию движения инструмента и генерирует код для конкретной модели станка. Встроенные функции верификации позволяют проверить программу в виртуальной среде до её запуска на реальном оборудовании, что исключает столкновения инструмента с деталью или приспособлением. Экономия только за счёт предотвращения таких столкновений покрывает затраты на CAM-систему в течение первого года эксплуатации [2].

CAE-системы решают задачи инженерного анализа: расчёт прочности и деформаций, теплового поведения, гидро- и аэродинамических характеристик изделия. Виртуальные испытания заменяют или существенно сокращают число физических прототипов, необходимых для доводки конструкции. Это особенно ценно при разработке изделий с длительным и дорогостоящим циклом физических испытаний: авиационных компонентов, энергетического оборудования, медицинских устройств. Снижение числа физических прототипов на один-два цикла сокращает затраты на разработку на 15-25% [3].

Концепция цифрового двойника распространяет логику компьютерного моделирования на весь жизненный цикл изделия. Цифровой двой-

ник – это виртуальная модель физического объекта, которая обновляется на основе данных, поступающих от реального объекта в процессе его эксплуатации. Для производственного предприятия это означает, что модель изделия сохраняет актуальность не только на этапе проектирования, но и после передачи изделия потребителю. Данные об отказах и отклонениях в эксплуатации возвращаются в конструкторскую систему и служат основой для совершенствования следующего поколения продукции.

Конкурентное преимущество от компьютерного проектирования реализуется только при условии интеграции CAD, CAM и CAE в единую информационную среду. Если данные передаются между системами вручную или через нейтральные форматы с потерей части атрибутов, значительная доля выигрыша во времени уходит на переработку и сверку данных. Единая PLM-платформа, управляющая жизненным циклом продукта, обеспечивает сквозное прохождение данных от концепции до производственной документации без ручных интерфейсов.

Малые и средние предприятия нередко ограничиваются одним из трёх классов систем, чаще всего CAD, и не реализуют потенциал сквозного проектирования. Причина, как правило, не в стоимости программного обеспечения, а в отсутствии специалистов, способных эффективно работать с CAM и CAE. Инвестиции в обучение технологов и конструкторов дают более высокую отдачу, чем приобретение дополнительных лицензий при нехватке компетентных пользователей. Предприятия с сильными внутренними компетенциями в области цифрового проектирования устойчивее конкурируют на рынках сложной технической продукции [4].

Скорость освоения новых изделий приобретает критическое значение на рынках с коротким жизненным циклом продукта. Производитель, который выводит на рынок обновлённую модель на три месяца раньше конкурента, получает ценовую премию и формирует лояльность потребителей. Компьютерное проектирование непосредственно влияет на этот показатель: параллельное ведение конструкторских и технологических работ в единой информационной среде сокращает суммарную длительность технологической подготовки производства на 30-45% [5].

Внедрение систем компьютерного проектирования требует пересмотра организации технологической службы предприятия. Традиционная схема, при которой конструктор передаёт технологу чертёж, а технолог разрабатывает маршрутную технологию независимо, неэффективна в цифровой среде. Интегрированное проектирование предполагает совместную работу конструктора и технолога над трёхмерной моделью изделия с учётом технологических ограничений с первых этапов разработки. Такой подход сокращает число конструктивных изменений на поздних стадиях, которые являются одним из главных источников потерь времени при технологической подготовке производства.

Список использованных источников

1. Инновации в экономическом руководстве. Искусство стратегического управления проектами в современном бизнесе / А.А. Сергеев, Е.В. Гаркушин, А.В. Лихоманова, В. М. Коробова // Менеджмент в социальных и экономических системах: Сборник докладов XV Международной научно-практической конференции, Пенза, 23–24 ноября 2023 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2023. – С. 337–340.
2. Сергеев, А.А. Японская и американская модели менеджмента / А.А. Сергеев // Менеджмент в социальных и экономических системах : Сборник докладов XVI Международной научно-практической конференции. В 2-х частях, Пенза, 15–16 ноября 2024 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2024. – С. 135–138.
3. Отраслевые особенности управления проектами / Н.А. Бородина, Н.Н. Борщев, А.А. Сергеев, М.А. Донец // Стратегическое развитие инновационного потенциала отраслей, комплексов и организаций: сборник статей X Международной научно-практической конференции, Пенза, 20–21 октября 2022 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2022. – С. 31–34.
4. Сергеев, А.А. Сравнение операционных систем персональных компьютеров / А.А. Сергеев // Менеджмент в социальных и экономических системах: Сборник докладов XVI Международной научно-практической конференции. В 2-х частях, Пенза, 15–16 ноября 2024 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2024. – С. 310–313.
5. Правовая ответственность проектных менеджеров. Предотвращение и урегулирование споров / А.А. Сергеев, А.В. Лихоманова, Е.В. Гаркушин, М.А. Донец // Менеджмент в социальных и экономических системах: Сборник докладов XV Международной научно-практической конференции, Пенза, 23–24 ноября 2023 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2023. – С. 105–108.

COMPUTER-AIDED DESIGN OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND ITS IMPACT ON PRODUCT COMPETITIVENESS

N.A. Sergeev¹, S.E. Voropaev²

¹*Don State Agrarian University, P. Persianovsky, Russia*

²*Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint-Petersburg, Russia*

The article explores the role of computer-aided design systems in shaping the competitive advantages of industrial enterprises. The functional capabilities of modern CAD/CAM/CAE systems and their practical application in technological preparation of production are analyzed. The impact of reducing design time on the market position of an enterprise is evaluated. The conditions under which digital design tools can fully realize their potential are considered.

Keywords: *computer-aided design, technological processes, product competitiveness, CAD/CAM, technological preparation of production, digital twin.*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ КАК ИНСТРУМЕНТ СНИЖЕНИЯ ИЗДЕРЖЕК НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ

Н.А. Сергеев¹, С.Е. Воропаев²

¹Донской государственный аграрный университет, п. Персиановский, Россия

²ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург, Россия

В статье рассматриваются подходы к применению математического моделирования производственных процессов на промышленных предприятиях с целью сокращения операционных издержек. Анализируются основные классы моделей, применяемых в производственной среде, и условия их практического использования. Показана взаимосвязь между точностью модели и экономическим эффектом от её внедрения. Предложены критерии оценки эффективности моделирования для задач оперативного управления производством.

Ключевые слова: математическое моделирование, производственные процессы, снижение издержек, промышленное предприятие, оптимизация, управление производством.

Промышленное предприятие функционирует в условиях постоянного давления на себестоимость продукции. Конкуренция на рынках сбыта сужает ценовые коридоры, а стоимость ресурсов растёт. В этой ситуации математическое моделирование производственных процессов превращается из теоретического инструмента в практический механизм управления затратами. Предприятия, которые систематически применяют модели для планирования загрузки мощностей, расчёта оптимальных партий и распределения ресурсов, сокращают производственные потери на 12-18% в сравнении с предприятиями, опирающимися на эмпирические нормативы [1].

Математическое моделирование охватывает широкий спектр задач производственного управления. Линейное программирование применяется для оптимизации производственного плана при ограниченных ресурсах. Модели массового обслуживания описывают поведение производственных потоков и позволяют рассчитать оптимальное число рабочих мест на участке. Имитационное моделирование воспроизводит динамику всей производственной системы и выявляет узкие места, которые невозможно обнаружить аналитически. Каждый класс моделей решает конкретный круг задач, и выбор инструмента определяется структурой производственного процесса, доступностью данных и требуемой точностью результата [2].

Ключевая проблема практического применения моделей состоит в качестве исходных данных. Производственные нормативы на многих предприятиях формировались десятилетиями и содержат систематические погрешности. Хронометраж операций проводился в благоприятных условиях, межоперационные потери учитывались частично, а потребление вспомогательных материалов часто относилось к накладным расходам без привязки к конкретному изделию. Модель, построенная на таких данных, воспроиз-

водит не реальный процесс, а его искажённое отражение. Поэтому внедрение математического моделирования требует предварительного аудита нормативной базы и перехода к прямому измерению параметров производственного процесса.

Практика показывает, что наибольший экономический эффект достигается не от разового применения модели, а от создания системы непрерывного моделирования. Модель обновляется по мере поступления фактических данных о выполнении производственных заданий, отклонениях от нормативов и изменениях в структуре заказов. Такой подход превращает модель в инструмент оперативного управления, а не только планирования. Диспетчерский персонал получает возможность пересчитывать производственную программу при изменении входных условий в течение нескольких минут, а не часов [3].

Отдельного внимания заслуживает применение моделирования для управления запасами. Запасы сырья, незавершённого производства и готовой продукции составляют значительную долю оборотных активов промышленного предприятия. Модели управления запасами, в том числе модели с фиксированным размером заказа и с фиксированным интервалом пополнения, позволяют определить оптимальный уровень страхового запаса исходя из реальной вариабельности спроса и сроков поставки, а не из усреднённых нормативов. Применение таких моделей на машиностроительных предприятиях сокращает объём замороженных в запасах средств на 20-30% без увеличения риска дефицита материалов [4].

Интеграция математических моделей с корпоративными информационными системами класса ERP существенно расширяет возможности их применения. Модель получает актуальные данные о состоянии производства в автоматическом режиме и передаёт результаты оптимизации непосредственно в плановые документы. Это устраняет разрыв между расчётным оптимумом и фактическими производственными решениями, который возникает при ручном переносе результатов моделирования в учётную систему. Предприятия, реализовавшие такую интеграцию, фиксируют снижение плановых ошибок на 35-40% и соответствующее сокращение потерь от неритмичности производства.

Оценка эффективности математического моделирования требует корректной методики. Прямое сравнение издержек до и после внедрения модели затруднено из-за изменения рыночной конъюнктуры, состава продукции и цен на ресурсы. Более надёжным подходом является сравнение фактических результатов с расчётными показателями модели: устойчивое совпадение свидетельствует о том, что модель адекватно описывает процесс и её рекомендации действительно исполняются. Дополнительным индикатором служит динамика производительности труда и коэффициента использования оборудования на участках, охваченных моделированием [5].

Перспективным направлением является применение методов стохастической оптимизации, которые учитывают неопределённость входных

параметров непосредственно в структуре модели. В отличие от детерминированных моделей, они формируют производственный план, устойчивый к колебаниям спроса и ресурсных ограничений. Это особенно актуально для предприятий, работающих в условиях нестабильного спроса или зависящих от импортных компонентов с длинным и непредсказуемым сроком поставки. Стохастические модели сложнее в построении, но обеспечивают более высокую практическую ценность в реальных производственных условиях.

Математическое моделирование производственных процессов не является универсальным средством сокращения издержек. Его эффективность определяется тремя условиями: достоверностью исходных данных, готовностью производственного персонала работать с модельными рекомендациями и наличием организационного механизма, который обеспечивает исполнение плановых решений. При соблюдении этих условий моделирование становится надёжным инструментом конкурентной борьбы, позволяющим снижать себестоимость без сокращения качества продукции и ухудшения условий труда.

Список использованных источников.

1. Бунчиков, О.Н. Управление бизнес-процессами: оптимизация и автоматизация для повышения эффективности / О.Н. Бунчиков, А.А. Сергеев, М.А. Донец // Инициативы молодых – науке и производству: Сборник статей VI Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и студентов, Пенза, 29–30 ноября 2023 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2023. – С. 163-167.

2. Сергеев, А.А. Себестоимость продукции и рентабельность предприятия / А.А. Сергеев, М.А. Донец, А.И. Осипова // Организационно-методические аспекты повышения качества образовательной деятельности и подготовки обучающихся по программам высшего и среднего профессионального образования: Сборник статей IV Всероссийской научно-методической конференции, Пенза, 31 октября 2022 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2022. – С. 357-360.

3. Исследование взаимосвязи между инфляцией и безработицей в современных условиях / А.А. Сергеев, Е.В. Гаркушин, А.В. Лихоманова, В.М. Коробова // Стратегическое развитие инновационного потенциала отраслей, комплексов и организаций: Сборник статей XI Международной научно-практической конференции, Пенза, 10–11 октября 2023 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2023. – С. 391-394.

4. Воздействие экологической проблемы на развитие экономики / А.А. Сергеев, М.В. Носова, Е.В. Гаркушин [и др.] // Проблемы социально-экономической устойчивости региона: Сборник статей XX Международной научно-практической конференции, Пенза, 25–26 января 2023 года / Под редакцией Г.А. Резник. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2023. – С. 410-413.

5. Сергеев, А.А. Оценка стоимости компании / А.А. Сергеев, М.С. Шейхова, С.В. Фатеева // Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития: Материалы международной научно-практической конференции, Красноярск, 20–22 апреля 2021 года. Том 2. Часть 2. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2021. – С. 381-383.

MATHEMATICAL MODELING OF PRODUCTION PROCESSES AS A TOOL FOR REDUCING COSTS IN AN INDUSTRIAL ENTERPRISE

N.A. Sergeev¹, S.E. Voropaev²

¹*Don State Agrarian University, P. Persianovsky, Russia*

²*Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint-Petersburg, Russia*

The article discusses approaches to the application of mathematical modeling of production processes in industrial enterprises in order to reduce operational costs. The main classes of models used in the production environment and the conditions for their practical application are analyzed. The relationship between the accuracy of the model and the economic effect of its implementation is shown. Criteria for evaluating the effectiveness of modeling for operational production management tasks are proposed.

Keywords: *mathematical modeling, production processes, cost reduction, industrial enterprise, optimization, production management.*

УДК 658.562:621

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ КОНТРОЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Н.А. Сергеев¹¹, С.Е. Воропаев²

¹*Донской государственный аграрный университет, п. Персиановский, Россия*

²*ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург, Россия*

В статье рассматриваются методы и инструменты управления качеством продукции, основанные на применении цифровых технологий контроля производственных процессов. Исследуются возможности автоматизированного мониторинга параметров производства для предупреждения дефектов. Анализируется опыт промышленных предприятий, внедривших цифровые системы контроля качества. Предложены рекомендации по формированию эффективной архитектуры цифровой системы управления качеством.

Ключевые слова: *управление качеством, цифровые технологии, контроль производственных процессов, дефекты, автоматизированный мониторинг, промышленное предприятие.*

Управление качеством продукции на протяжении нескольких десятилетий развивалось в направлении от контроля готовой продукции к управлению производственными процессами. Концепция TQM, методология Six Sigma, стандарты серии ISO 9000 закрепили этот сдвиг в

¹¹ Научный руководитель: Федюк Е.И.

управленческой практике. Цифровые технологии предоставляют инструментальную базу, которая позволяет реализовать принципы процессного управления качеством в полной мере: с измерением всех значимых параметров, непрерывным анализом данных и автоматической реакцией на отклонения.

Архитектура цифровой системы управления качеством включает несколько уровней. Нижний уровень образуют измерительные устройства, встроенные в производственный процесс: датчики давления, температуры, усилия, геометрических параметров, оптические системы технического зрения. Средний уровень составляют системы сбора и первичной обработки данных, которые агрегируют показания датчиков и передают их в систему управления. Верхний уровень включает программное обеспечение для статистического анализа, построения контрольных карт и формирования управленческих отчётов. Эффективность системы определяется качеством интеграции всех трёх уровней [1].

Системы технического зрения обеспечивают автоматический визуальный контроль поверхности изделий со скоростью и воспроизводимостью, недоступными человеку-контролёру. Промышленная камера делает 20-50 снимков в секунду, программный модуль анализирует каждый кадр и выявляет дефекты поверхности размером от десятых долей миллиметра. Система никогда не устаёт, не отвлекается и не пропускает дефекты из-за субъективной оценки. Внедрение технического зрения на операциях выходного контроля в металлургической и машиностроительной промышленности снижает долю дефектной продукции, поставленной потребителю, на 60-80%.

Методология измерения системы анализа результатов и воспроизводимости MSA является обязательным элементом цифровой системы контроля качества. Даже высокоточные цифровые измерительные устройства вносят погрешность в результаты измерений. MSA-анализ определяет вклад измерительной системы в общую вариабельность результатов и устанавливает, насколько система измерения пригодна для мониторинга конкретного параметра. Результаты, полученные на основе измерительной системы с высокой собственной погрешностью, дезориентируют технологов и могут привести к ошибочной корректировке стабильного процесса.

Цифровые технологии контроля производственных процессов открывают возможность применения многомерного статистического контроля. Традиционные контрольные карты отслеживают один параметр. Многомерные методы, в частности Т-квадрат Хотеллинга, отслеживают одновременно несколько коррелированных параметров и обнаруживают отклонения, которые остаются незаметными при контроле каждого параметра в отдельности. Это особенно важно в химической, фармацевтической и пищевой промышленности, где качество продукта определяет-

ся не одним параметром, а профилем из десятков взаимосвязанных показателей [2].

Управление качеством на основе цифровых данных требует формирования базы знаний о несоответствиях и их причинах. Каждый выявленный дефект регистрируется в системе с описанием условий производства, результатами анализа причин и принятыми корректирующими мерами. Накопленная база позволяет при повторном появлении дефекта немедленно обратиться к опыту его предыдущего устранения, не проводя анализ причин заново. Предприятия с развитой базой знаний по несоответствиям устраняют повторяющиеся дефекты в среднем в три раза быстрее, чем предприятия без такой базы [3].

Интеграция цифровой системы управления качеством с системой управления производством позволяет реализовать автоматическую блокировку дефектной продукции. При выявлении несоответствия система автоматически присваивает партии статус карантина в учётной системе, исключая её передачу на следующую операцию или отгрузку потребителю. Это устраняет риск случайного попадания дефектной продукции к потребителю из-за ошибки оператора или несвоевременной передачи информации между службами [4].

Экономический эффект от внедрения цифровых технологий контроля качества складывается из нескольких составляющих. Снижение доли дефекта сокращает затраты на переработку и утилизацию бракованной продукции. Предупреждение отклонений процессов уменьшает потери от аварийных остановок оборудования. Автоматизация контрольных операций освобождает персонал для более квалифицированных задач. Снижение числа претензий потребителей сохраняет репутацию предприятия и снижает затраты на гарантийное обслуживание. Совокупный эффект на предприятиях, системно внедривших цифровой контроль качества, составляет 3-5% от выручки ежегодно [5].

Цифровые технологии контроля качества не заменяют компетентных специалистов по качеству, но существенно повышают их производительность. Специалист, имеющий доступ к полным данным о параметрах всех процессов в реальном времени, способен управлять качеством производства, которое в традиционной схеме требовало бы значительно большего числа контролёров. Инвестиции в цифровые системы и в развитие аналитических компетенций персонала службы качества создают синергетический эффект, обеспечивающий устойчивое конкурентное преимущество на рынках требовательных потребителей.

Список использованных источников

1. Сергеев, А.А. Современный подход к анализу актуальных проблем стандартизации / А.А. Сергеев, М.А. Донец, А.И. Осипова // Формирование и реализация стратегии устойчивого экономического развития Российской Федерации: Сборник статей XII Международной научно-практической конференции, Пенза,

09–10 декабря 2022 года / Под научной редакцией В.Н. Лазарева, Б.Я. Татарских. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2022. – С. 356–360.

2. Бунчиков, О.Н. Управление бизнес-процессами: оптимизация и автоматизация для повышения эффективности / О.Н. Бунчиков, А.А. Сергеев, М.А. Донец // Инициативы молодых – науке и производству: Сборник статей VI Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и студентов, Пенза, 29–30 ноября 2023 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2023. – С. 163–167.

3. Цифровая экономика: суть, характеристика цифрового общества, тенденции и проблемы развития / А.А. Сергеев, Т.Ю. Животова, М.В. Носова [и др.] // Проблемы социально-экономической устойчивости региона: Сборник статей XX Международной научно-практической конференции, Пенза, 25–26 января 2023 года / Под редакцией Г.А. Резник. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2023. – С. 419–422.

4. Современный подход к изучению облачных технологий необходимых для развития цифровой экономики / Н.А. Бородина, Е.В. Гаркушин, А.А. Сергеев, Е.Р. Раилян // Наука, образование и бизнес: новый взгляд или стратегия интеграционного взаимодействия: Сборник научных трудов по материалам II Международной научно-практической конференции, Нальчик, 20–22 октября 2022 года. Том Часть 1. – Нальчик: Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова, 2022. – С. 29–32.

5. Сергеев, А. . Себестоимость продукции и рентабельность предприятия / А.А. Сергеев, М.А. Донец, А.И. Осипова // Организационно-методические аспекты повышения качества образовательной деятельности и подготовки обучающихся по программам высшего и среднего профессионального образования: Сборник статей IV Всероссийской научно-методической конференции, Пенза, 31 октября 2022 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2022. – С. 357–360.

QUALITY MANAGEMENT BASED ON DIGITAL TECHNOLOGIES FOR MONITORING PRODUCTION PROCESSES

N.A. Sergeev¹, S.E. Voropaev²

¹*Don State Agrarian University, P. Persianovsky, Russia*

²*Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint-Petersburg, Russia*

The article discusses methods and tools for quality management based on the use of digital technologies for monitoring production processes. The possibilities of automated monitoring of production parameters for defect prevention are explored. The experience of industrial enterprises that have implemented digital quality control systems is analyzed. Recommendations for creating an effective digital quality management system are proposed.

Keywords: *quality management, digital technologies, production process monitoring, defects, automated monitoring, industrial enterprise.*

¹ Scientific Supervisor: Feduk Elena Ivanovna

ЦИФРОВИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ПРЕДПРИЯТИЯ

Н.А. Сергеев¹, С.Е. Воропаев²

¹Донской государственный аграрный университет, п. Персиановский, Россия

²ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург, Россия

Статья исследует процессы цифровизации систем управления качеством продукции на промышленных предприятиях и их влияние на технологический потенциал. Рассматриваются инструменты цифрового контроля качества, включая автоматизированные системы измерения и статистический контроль процессов в режиме реального времени. Анализируется связь между качеством производственных процессов и технологической зрелостью предприятия. Определяются ключевые направления развития цифровых систем управления качеством.

Ключевые слова: управление качеством, цифровизация, технологический потенциал, статистический контроль, производственные процессы, промышленное предприятие.

Технологический потенциал предприятия определяется способностью производственной системы стабильно воспроизводить заданные характеристики продукции при изменяющихся внешних условиях. Система управления качеством является одним из ключевых компонентов этого потенциала: она обнаруживает отклонения процессов, устанавливает их причины и обеспечивает возврат к стабильному состоянию. Цифровизация этой системы кардинально повышает скорость и точность всех трёх функций.

Традиционный контроль качества опирается на выборочные измерения готовых изделий или полуфабрикатов в контрольных точках производственного процесса. Промежуток между измерениями позволяет процессу уйти в нестабильное состояние и произвести значительное количество дефектной продукции до обнаружения отклонения. Цифровые системы измерения, интегрированные непосредственно в производственный процесс, обеспечивают контроль ключевых параметров в режиме реального времени и сигнализируют об отклонении немедленно. Это сокращает долю дефектной продукции, произведённой за время от появления отклонения до его устранения, в 5-8 раз [1].

Координатно-измерительные машины с автоматической загрузкой деталей обеспечивают стопроцентный контроль геометрических параметров в условиях серийного производства без увеличения численности контролёров. Результаты измерений передаются в систему управления качеством, где автоматически рассчитываются показатели воспроизводимости процесса. При снижении индекса воспроизводимости ниже установленного порога система формирует предупреждение для технолога, не дожидаясь

появления фактического дефекта. Такой подход реализует принцип управления по предупреждению, а не по факту несоответствия [2].

Статистический контроль производственных процессов в цифровом исполнении обрабатывает данные измерений в реальном времени и строит контрольные карты автоматически. Оператор видит текущее состояние процесса на мониторе рабочего места и получает предупреждение при появлении статистически значимых трендов. Это переносит функцию мониторинга качества от специалиста-контролёра к оператору оборудования и сокращает реакцию на отклонение с часов до минут [3].

Цифровизация системы управления качеством формирует массив данных, который ранее был недоступен для анализа. Результаты измерений, параметры режимов обработки, данные о состоянии инструмента и оборудования фиксируются в единой базе данных с временными метками. Анализ этих данных методами машинного обучения позволяет выявить неочевидные зависимости между параметрами процесса и качеством продукции. Предприятие получает возможность управлять качеством не через симптомы, а через корневые причины изменчивости процессов.

Технологический потенциал предприятия повышается за счёт накопления цифровых компетенций в области управления качеством. Специалисты, работающие с цифровыми системами контроля, формируют навыки анализа данных и системного мышления, применимые к широкому кругу производственных задач. Предприятие, где культура управления на основе данных сформирована в службе качества, значительно проще распространяет её на другие функциональные области.

Цифровая система управления качеством обеспечивает прослеживаемость продукции на всех этапах производственного цикла. Каждое изделие или партия изделий связана с данными об операторе, оборудовании, инструменте и материалах, применявшихся при её изготовлении. При обнаружении проблемы в эксплуатации предприятие может в течение минут установить все производственные условия изготовления данной партии и определить границы потенциально затронутых изделий. Это снижает масштаб отзывов продукции и минимизирует репутационные потери [4].

Внедрение цифровых систем управления качеством сопряжено с организационными изменениями. Роль службы качества смещается от контроля к анализу и предупреждению. Функция контролёра-браковщика постепенно замещается функцией аналитика данных о процессах. Предприятия, не перестроившие организационную модель службы качества параллельно с внедрением цифровых инструментов, используют дорогостоящие системы лишь для автоматической регистрации данных, не извлекая из них управленческой ценности [5].

Взаимосвязь между цифровизацией управления качеством и технологическим потенциалом предприятия носит двусторонний характер. Цифровые системы повышают стабильность процессов и снижают долю дефекта, что непосредственно улучшает технологические показатели. Одновременно рост технологического потенциала расширяет возможности цифровых

систем: чем стабильнее процессы, тем точнее модели прогнозирования качества и тем раньше система обнаруживает отклонения от нормального состояния.

Список использованных источников

1. Цифровая экономика: суть, характеристика цифрового общества, тенденции и проблемы развития / А.А. Сергеев, Т.Ю. Животова, М.В. Носова [и др.] // Проблемы социально-экономической устойчивости региона: Сборник статей XX Международной научно-практической конференции, Пенза, 25–26 января 2023 года / Под редакцией Г.А. Резник. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2023. – С. 419-422.

2. Сергеев, А.А. Современный подход к анализу актуальных проблем стандартизации / А.А. Сергеев, М.А. Донец, А.И. Осипова // Формирование и реализация стратегии устойчивого экономического развития Российской Федерации: Сборник статей XII Международной научно-практической конференции, Пенза, 09–10 декабря 2022 года / Под научной редакцией В.Н. Лазарева, Б.Я. Татарских. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2022. – С. 356-360.

3. Бунчиков, О.Н. Управление бизнес-процессами: оптимизация и автоматизация для повышения эффективности / О.Н. Бунчиков, А.А. Сергеев, М.А. Донец // Инициативы молодых – науке и производству : Сборник статей VI Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и студентов, Пенза, 29–30 ноября 2023 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2023. – С. 163-167.

4. Использование цифровых технологий в финансовой сфере / Н.А. Бородина, Е.В. Гракушин, А.А. Сергеев, Е.Р. Раильян // Стратегическое развитие инновационного потенциала отраслей, комплексов и организаций: сборник статей X Международной научно-практической конференции, Пенза, 20–21 октября 2022 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2022. – С. 35-38.

5. Сергеев, А. А. Себестоимость продукции и рентабельность предприятия / А.А. Сергеев, М.А. Донец, А.И. Осипова // Организационно-методические аспекты повышения качества образовательной деятельности и подготовки обучающихся по программам высшего и среднего профессионального образования: Сборник статей IV Всероссийской научно-методической конференции, Пенза, 31 октября 2022 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2022. – С. 357-360.

DIGITALIZATION OF PRODUCT QUALITY MANAGEMENT SYSTEMS AS A FACTOR IN INCREASING THE TECHNOLOGICAL POTENTIAL OF AN ENTERPRISE

N.A. Sergeev¹, S.E. Voropaev²

¹Don State Agrarian University, P. Persianovsky, Russia

²Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint-Petersburg, Russia

The article explores the processes of digitalization of product quality management systems in industrial enterprises and their impact on technological potential. The article examines the tools of digital quality control, including automated measurement systems and real-time statistical process control. The article analyzes the relationship be-

tween the quality of production processes and the technological maturity of an enterprise. The article identifies key areas for the development of digital quality management systems.

Keywords: quality management, digitalization, technological potential, statistical control, production processes, industrial enterprise.

УДК 004.912, 004.421.2

АЛГОРИТМЫ ТРАССИРОВКИ ЗНАНИЙ И ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ ЗАДАЧ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

А.К. Сиукаева, А.В. Матыцин, Л.В. Гаев

*Липецкий государственный технический университет,
г. Липецк, Россия*

В статье рассматриваются архитектурные подходы к построению адаптивных интеллектуальных систем на основе искусственного интеллекта. Анализируются алгоритмы трассировки знаний (BKT, DKT, SAKT), методы оптимизации административных задач (составление расписаний) и способы обеспечения конфиденциальности данных (федеративное обучение).

Ключевые слова: искусственный интеллект, адаптивные системы, трассировка знаний, байесовские модели, глубокое обучение, федеративное обучение.

Введение. Современная адаптивная система находится в условиях масштабной цифровой трансформации. Развитие интеллектуальных алгоритмов, автоматизированных платформ и генеративных моделей привело к изменению традиционных подходов к работе и организации процессов. Искусственный интеллект постепенно становится не только техническим инструментом, но и полноценным элементом цифровой инфраструктуры. В условиях постоянного увеличения объема информации и роста требований к качеству подготовки кадров организации стремятся внедрять технологии, позволяющие повысить эффективность работы, индивидуализировать процессы и оптимизировать деятельность операторов. Актуальность исследования определяется необходимостью комплексного анализа влияния ИИ на современные интеллектуальные системы и определения перспектив дальнейшего развития данной сферы.

С технической точки зрения задача персонализации сводится к построению адаптивной системы, которая в реальном времени обрабатывает поток данных о действиях пользователя: время решения задачи, последовательность навигации по учебным материалам, результаты промежуточных тестирований. Ключевым вызовом является разработка алгоритмов, способных формировать динамическую модель состояния агента (knowledge tracing) с минимальной задержкой и при неполных входных данных. В отличие от классических рекомендательных систем (например,

в e-commerce), адаптивные системы работают в условиях ограниченной обратной связи и высоких требований к валидности оценки. В данной работе рассматриваются архитектурные подходы к построению таких систем, включая байесовские модели знаний, алгоритмы глубокого обучения для анализа последовательностей действий и методы обработки естественного языка для оценки открытых ответов.

Персонализация и адаптивные системы. Главный революционный потенциал искусственного интеллекта заключается в его способности обеспечивать действительно персонализированную настройку. Традиционные системы, ориентированные на среднего пользователя, неизбежно оставляют позади тех, кто нуждается в дополнительной поддержке, и тех, кто опережает средние показатели.

Системы искусственного интеллекта, использующие алгоритмы машинного обучения, способны анализировать большие объемы данных о действиях агента: время выполнения операций, количество ошибок, тип ошибок и предпочтительный способ получения информации. На основе этого анализа создаются персонализированные траектории работы. Система может автоматически корректировать сложность и темп подачи материала, предлагать дополнительные упражнения для преодоления слабых мест или, наоборот, пропускать темы, которые уже были освоены. Интеллектуальные платформы интегрируют функции виртуального взаимодействия с использованием ИИ. Эти системы обеспечивают мгновенную обратную связь, помогают анализировать ошибки и предоставляют дополнительные материалы для закрепления изученного материала. Это важно для удаленной работы и автономного функционирования.

Для наглядного сравнения представлена таблица 1, в которой систематизированы различия между традиционной системой и адаптивной системой на ИИ

Таблица 1 – Сравнение традиционной LMS и адаптивной системы на ИИ

Критерий	Традиционная система	Адаптивная система на ИИ
Модель агента	Отсутствует / статическая	Динамическая (обновляется после каждого действия)
Алгоритм подбора заданий	Фиксированная последовательность	Multi-armed bandit / DQN
Тип обратной связи	Отложенная (после проверки)	Мгновенная (в реальном времени)

Алгоритмы трассировки знаний: сравнительный анализ. Ключевым техническим компонентом любой адаптивной системы является модуль трассировки знаний (knowledge tracing), который в реальном времени оценивает степень освоения каждого концепта на основе истории взаимодействий студента. Рассмотрим основные подходы.

Байесовская трассировка знаний (ВКТ). Модель использует скрытую марковскую цепь с четырьмя параметрами: $P(L_0)$ – вероятность начального знания концепта, $P(T)$ – вероятность перехода из состояния «не знает» в

состояние «знает» после попытки, $P(G)$ – вероятность угадать правильный ответ при отсутствии знания, $P(S)$ – вероятность ошибиться при наличии знания.

Основное ограничение ВКТ – предположение о независимости концептов, что не соответствует реальной структуре знаний.

Глубокая трассировка знаний (DKT). Модель на основе рекуррентной нейронной сети (LSTM) принимает на вход пары (задание, ответ) и прогнозирует вероятность правильного ответа на следующее задание. Преимущество – отсутствие необходимости в ручном выделении концептов и возможность учёта долгосрочных зависимостей. Эксперименты на открытом датасете ASSISTments 2017 показывают $AUC = 0,82–0,85$ для DKT, что на 5–7% выше ВКТ.

Трансформерные модели (SAKT). Используют механизм самовнимания (self-attention) для взвешивания важности предыдущих взаимодействий при прогнозе. Позволяют учитывать взаимосвязи между разными темами. Достигают AUC до 0,87, однако требуют на порядок больше вычислительных ресурсов и обучаются на существенно больших выборках ($>10^5$ записей).

Выбор конкретной модели определяется доступными вычислительными ресурсами и размером датасета. Для небольших курсов (до 10^3 записей) рекомендована ВКТ, для крупных онлайн-платформ – DKT или SAKT.

Системы искусственного интеллекта могут проверять тесты, письменные задания, программный код и другие учебные материалы. Кроме того, интеллектуальные алгоритмы могут быстро выявлять пробелы в знаниях учащихся и генерировать статистику успеваемости.

Технологии искусственного интеллекта также используются в административных областях: составление расписаний в учебном заведении, анализ рабочей нагрузки, прогнозирование производительности и распределение ресурсов.

Изменение контента и генеративные возможности. Развитие генеративных моделей ИИ существенно повлияло на создание адаптивного контента. Искусственный интеллект способен адаптировать сложные тексты под разные уровни сложности, генерировать уникальные задачи и формировать интерактивные данные.

В производственной и исследовательской среде активно развиваются виртуальные лаборатории и цифровые симуляции, позволяющие проводить эксперименты в безопасной среде без необходимости использования дорогостоящего оборудования.

Заключение. В работе рассмотрены архитектурные подходы к построению адаптивных интеллектуальных систем на основе искусственного интеллекта. Показано, что ключевыми алгоритмическими компонентами являются байесовские модели знаний (ВКТ) и глубокие модели трассировки знаний (DKT, SAKT). Для автоматизации административных задач (составление расписаний) предложено использование генетических алгорит-

мов. Перспективным направлением является применение федеративного обучения для обеспечения конфиденциальности данных при сохранении качества работы системы.

Список использованных источников

1. Баранов А.А. Искусственный интеллект и цифровизация образования // Современные образовательные технологии. – 2024.
2. Иванова Е.В. Технологии искусственного интеллекта в цифровой среде. – Москва: Наука, 2023.
3. Кузнецов П.И. Цифровая трансформация высшего образования // Педагогика и общество. – 2024.
4. Russell S., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. – Pearson Education, 2021.
5. Holmes W. Artificial Intelligence in Education. – UNESCO Publishing, 2022.

KNOWLEDGE TRACING ALGORITHMS AND OPTIMIZATION OF MANAGEMENT TASKS IN INTELLIGENT SYSTEMS

A.K. Siukaeva, A.V. Matytsin, L.V. Gaev

*Lipetsk State Technical University,
Lipetsk, Russia*

The article examines architectural approaches to building adaptive intelligent systems based on artificial intelligence. The authors analyze knowledge tracing algorithms (BKT, DKT, SAKT), methods for optimizing administrative tasks (scheduling), and approaches to ensuring data confidentiality (federated learning).

Keywords: artificial intelligence, adaptive systems, knowledge tracing, Bayesian models, deep learning, federated learning.

УДК 621.833.6

РАЗРАБОТКА ПЛАНЕТАРНОГО МЕХАНИЗМА ПЕРЕНОСНОГО СТАНКА ДЛЯ АБРАЗИВНОЙ ДОВОДКИ ПРИ ЕГО МОДЕРНИЗАЦИИ

В.А. Скрыбин, С.А. Гусев

*ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»,
г. Пенза, Россия*

В статье рассмотрена возможность модернизации переносного станка для притирки уплотнительных поверхностей задвижек. В качестве прототипа выбран станок, описанный в патенте RU2553752. Предложена замена штатного инструментального блока на блок с планетарным механизмом, обеспечивающим принудительное вращение притиров. Приведены кинематические и силовые соотношения, а также пространственная модель модернизированного узла.

Ключевые слова: переносной станок, притирка, планетарный механизм, инструментальный блок, модернизация.

Введение

Современные требования к герметичности трубопроводной арматуры, работающей в условиях высоких давлений и агрессивных сред, обуславливают необходимость совершенствования финишных операций обработки уплотнительных поверхностей. Одним из эффективных методов является абразивная доводка, выполняемая с помощью переносных станков, которые позволяют проводить ремонт без демонтажа задвижки с трубопровода.

Актуальность работы связана с недостатками существующих кинематических схем, в которых вращение притиров вокруг собственной оси происходит пассивно, за счёт сил трения. Это приводит к нестабильности процесса, самоторможению инструмента и снижению качества обработки.

Цель статьи- обоснование и описание модернизации переносного станка путём замены его инструментального блока на блок с планетарным механизмом, обеспечивающим принудительное вращение притиров.

1. Конструкция базового станка (по патенту RU2553752)

В качестве прототипа для модернизации принят переносной станок для притирки седловых уплотнительных поверхностей в корпусе задвижки [1], защищённый патентом RU2553752 (Рис. 1-3, см. фиг.1-3 патента).

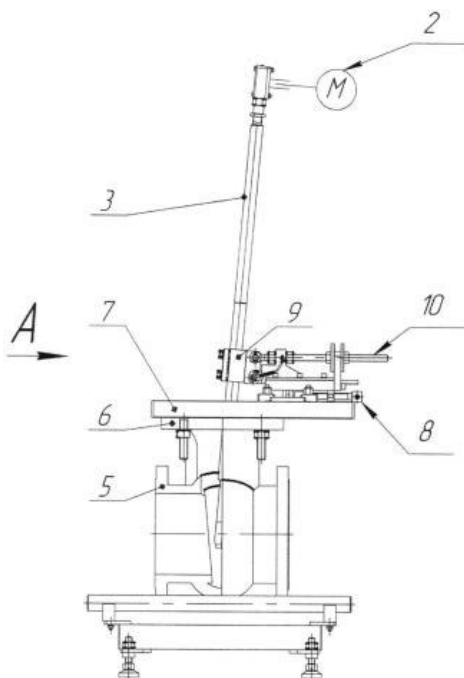


Рисунок 1 – Станок переносной на корпусе задвижки

Станок содержит блок 1 с притирами, кинематически соединённый с приводом 2 через стойку 3, выполненную в виде двух параллельных трубок 4. Стойка 3 имеет основание 7, которое устанавливается на средний фланец 6 корпуса задвижки 5. Механизм 8 фиксации и позиционирования включает хомут 9 и винт 10, позволяющий перемещать стойку 3 с блоком 1 относительно основания 7 для обеспечения необходимого усилия прижима притиров к обрабатываемой поверхности.

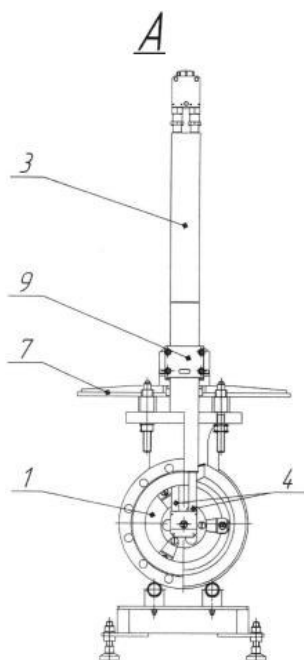


Рисунок 2 – То же, вид А;

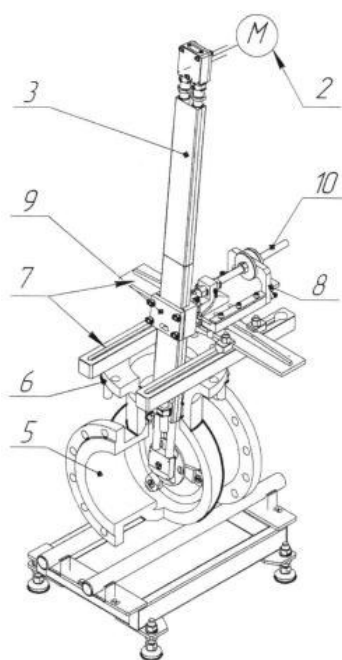


Рисунок 3 – То же, изображение в аксонометрии;

В исходной конструкции патента предусмотрен тензометрический датчик с блоком управления для контроля усилия прижима. Поскольку в настоящей работе акцент сделан на модернизацию кинематики инструментального блока, указанные элементы не рассматриваются.

2. Предлагаемая модернизация инструментального блока

Вместо штатного блока 1 предлагается использовать модернизированный инструментальный блок, внутри которого размещён планетарный зубчатый механизм (рис. 4). На рис.4 показана пространственная модель механизма в изометрической проекции [2,3].

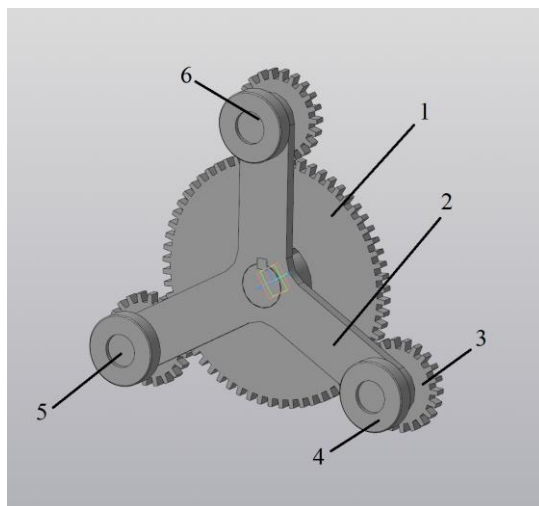


Рисунок 4 – Пространственная модель планетарного механизма инструментального блока (позиции: 1 – солнечное колесо; 2 – водило; 3 – сателлиты; 4 – притиры; 5 – оси сателлитов; 6 – подшипники)

Конструкция механизма включает:

Солнечное колесо (поз. 1) – неподвижно закреплено относительно корпуса станка. Имеет модуль зацепления $m = 7$ мм, число зубьев $Z_s = 64$, делительный диаметр 448 мм.

Водило (поз. 2) – вращающийся элемент, получающий движение от привода 2 через стойку 3. Частота вращения водила n_h 30 об/мин. Диаметр расположения осей сателлитов – 602 мм.

Сателлиты (поз. 3) – три зубчатых колеса, установленных на осях 5 водила посредством подшипников 6. Каждый сателлит имеет $m = 7$ мм, $Z_p = 22$, делительный диаметр 154 мм.

Притиры (поз. 4) – жёстко закреплены на валах сателлитов. Наружный диаметр притиров 110-130 мм, толщина диска 20-30 мм.

Принцип работы: вращение от привода M передаётся на водило 2. Сателлиты 3, находясь в зацеплении с неподвижным солнечным колесом 1, обкатываются по нему. В результате каждый сателлит совершает сложное движение: переносное (вместе с водилом) и относительное (вокруг собственной оси). Это движение передаётся притирам 4, которые получают принудительное вращение с частотой, определяемой геометрией зацепления.

3. Кинематический анализ

Для расчёта частоты вращения притиров используем метод Виллиса. Для планетарного механизма с неподвижным солнечным колесом ($n_s = 0$):

$$(n_p - n_h) / (0 - n_h) = -Z_s / Z_p.$$

После преобразований получаем:

$$n_p / n_h = 1 + Z_s / Z_p.$$

Подставляя значения: $n_p / n_h = 1 + 64/22 = 3,909$.

Отсюда при $n_h = 30$ об/мин частота вращения притиров составляет:

$$n_p = 30 \cdot 3,909 = 117,27 \text{ об/мин.}$$

4. Силовые параметры

Мощность резания при абразивной доводке [4] определяется выражением:

$$N_{\text{рез}} = n \cdot f \cdot F_{\text{пр}} \cdot V_C,$$

где $n = 3$ – количество притиров, $f = 0,25$ – коэффициент трения, $F_{\text{пр}} = 100$ Н – усилие прижима, V_C – линейная скорость обработки.

Линейная скорость V_C связана с угловой скоростью водила ω_1 и средним радиусом расположения притиров $R_{\text{ср}} = 0,301$ м:

$$V_C = \omega_1 \cdot R_{\text{ср}}$$

При $n_h = 30$ об/мин: $\omega_1 = \pi \cdot 30/30 = 3,14$ рад/с, $V_C = 3,14 \cdot 0,301 = 0,945$ м/с.

Тогда $N_{\text{рез}} = 3 \cdot 0,25 \cdot 100 \cdot 0,945 = 70,9$ Вт.

Мощность привода станка должна быть не менее полученного значения.

Заключение

Предложена модернизация переносного станка для притирки, заключающаяся в замене штатного инструментального блока на блок с планетарным механизмом. Такое решение обеспечивает:

- принудительное вращение притиров, не зависящее от сил трения;
- стабильность кинематических параметров обработки;

возможность точного расчёта режимов резания.

Разработана пространственная модель модернизированного узла. Полученные аналитические зависимости могут быть использованы при проектировании аналогичного оборудования.

Список использованных источников

1. Патент RU2553752. Станок переносной для притирки седловых уплотнительных поверхностей в корпусе задвижки. – Оpubл. 20.06.2015.
2. Скрябин В.А., Гусев С.А. Модернизация станка для абразивной доводки // Материалы конференции – 2025.
3. Скрябин В.А., Гусев С.А. Разработка планетарного механизма инструментального блока для переносного притирочно-доводочного станка // Вестник ПГУ. – 2025.
4. Орлов П.Н. Технологическое обеспечение качества деталей методами доводки. – М.: Машиностроение, 1988. – 384 с.

DEVELOPMENT OF A PLANETARY MECHANISM OF A PORTABLE MACHINE FOR ABRASIVE FINISHING DURING ITS UPGRADATION

Skryabin, S.A. Gusev V.A.

*FGBOU VO «Penza State University»,
Penza, Russia*

The article considers the possibility of upgrading a portable machine for lapping the sealing surfaces of gate valves. The machine described in patent RU2553752 was chosen as a prototype. The proposed solution involves replacing the standard tool block with a block equipped with a planetary mechanism that ensures the forced rotation of the laps. The article provides kinematic and force relationships, as well as a three-dimensional model of the upgraded unit.

Keywords: portable machine, lapping, planetary mechanism, tool block, modernization.

УДК 004.94

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АНАЛИЗ ИНВЕСТИЦИОННОГО ПРОЕКТА С ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ-ФОРМУЛЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАФОАНАЛИЗАТОРА

А.Ю. Соколова, Д.А. Попова, В.А. Рязанцева

*Кемеровский государственный университет,
Кемерово, РФ*

В статье рассматриваются вопросы автоматизированной оценки эффективности инвестиционно-производственных проектов с помощью формулы-модели, выявляющей жизненный цикл проектов. Анализ модели может осуществляться с помощью любого параметрического графоанализатора функций, что позволяет использовать результаты расчетов как на уровне предприятий, так и на

уровне экономических территорий в условиях оперативной поддержки принятия инвестиционных решений.

Ключевые слова: инвестиционный проект, оценка экономической эффективности, амортизация, жизненный цикл проекта, параметрический графоанализатор.

При управлении экономическими системами и процессами часто возникает потребность оперативной оценки эффективности инвестиционных проектов. Инвестиционный проект – это проект, связанный с вложением средств (инвестициями) в производственные активы для процесса производства продукции (товара и/или услуги). Для инвестора в этом случае требуется надежное обоснование решения об инвестициях в проект, так как, в случае неудачи, вложенные средства, как правило, теряются. Оперативная оценка эффективности инвестиционных проектов также требуется, если производственная организация активно развивается и осуществляет множество своих проектов развития. Все это подчеркивает актуальность темы настоящего исследования.

При оценке эффективности инвестиционных проектов экономисты традиционно используют несколько показателей. Одним из основных показателей является чистая приведенная стоимость (Net Present Value, NPV), которая рассчитывается по формуле [1]

$$NPV(r) = \sum_{t=1}^T \frac{W(t)}{(1+r)^t} - I \quad (1)$$

В данной формуле используются следующие обозначения: $W(t)$ – это прибыль организации за период t ($t=0,1,\dots,T$), T – горизонт планирования, I – суммарные инвестиции в проект развития организации в начальный момент его реализации; r – ставка дисконтирования, учитывающая риски инфляции и заемного финансирования деятельности производителя. При внимательном рассмотрении можно заметить, что формула (1) не учитывает экономический закон существования жизненного цикла инвестиционных проектов, заключающийся в том, что в какой-то момент своего развития каждый проект должен достигать максимума своего финансового эффекта, а затем, со временем, уменьшать свои показатели эффективности за счет материального или морального износа ресурсов – капитала, труда, земли. В формуле же (1) предполагается неотрицательность слагаемых под знаком суммы, так как, в противном случае, инвестиционный проект грозит стать убыточным.

Если в формуле (1) принять условие, что $W(t) = W = \text{const}$ ($t=1,\dots,T$), то под знаком суммы возникает геометрическая прогрессия и формула преобразуется к виду:

$$NPV = \frac{1-(1+r)^{-T}}{r} W - I \quad (2)$$

На основании интегральной теоремы Лагранжа о среднем [2], возникающая при таком допущении погрешность практически полностью ниве-

лируется. При этом возникает существенное преимущество для проведения численных расчетов, когда чисто динамическая задача от времени t превращается [3] в псевдодинамическую, где функцию времени начинает выполнять горизонт планирования T . Таким образом, анализ формулы (2) можно осуществить, используя параметрический графоанализатор, например, встроенный в программный комплекс [4], неоднократно апробированный при решении задач экономического содержания [5], или любой другой графоанализатор [6].

В работе [7] предложена модификация формулы (1), учитывающая амортизацию капитальных ресурсов:

$$NPV(r) = \sum_{t=1}^T \frac{W(t) + k \cdot Am \cdot (T_{am} - t)}{(1+r)^t} - I \quad (3)$$

где T_{am} – срок службы комплекта основных производственных фондов (ОПФ), $Am = T/T_{am}$ – рассчитываемая по линейному закону норма амортизации ОПФ, k – некоторый нормирующий множитель, для определенности принимаемый за единицу. В формуле (3) уже, в отличие от (1), под знаком суммы содержится отрицательная составляющая, которая зависит от времени t функционирования инвестиционного проекта. С использованием полученных в [7] выкладок, формула (3) преобразуется в многопараметрическую формулу-модель, анализ которой также проводится с помощью графоанализаторов.

Для иллюстрации результатов исследования изучим влияние на эффективность инвестиционного проекта такого параметра формулы (3), как ставка дисконтирования r . Предварительно зафиксируем входные значения: $I = 100$ д.е., $W = 66$ д.е., $T = 5$, $T_{am} = 10$. Рассмотрим далее зависимости $NPV(T)$ при следующих сценариях: $r = 20\%$, $r = 25\%$ и $r = 30\%$ (см. рисунок).

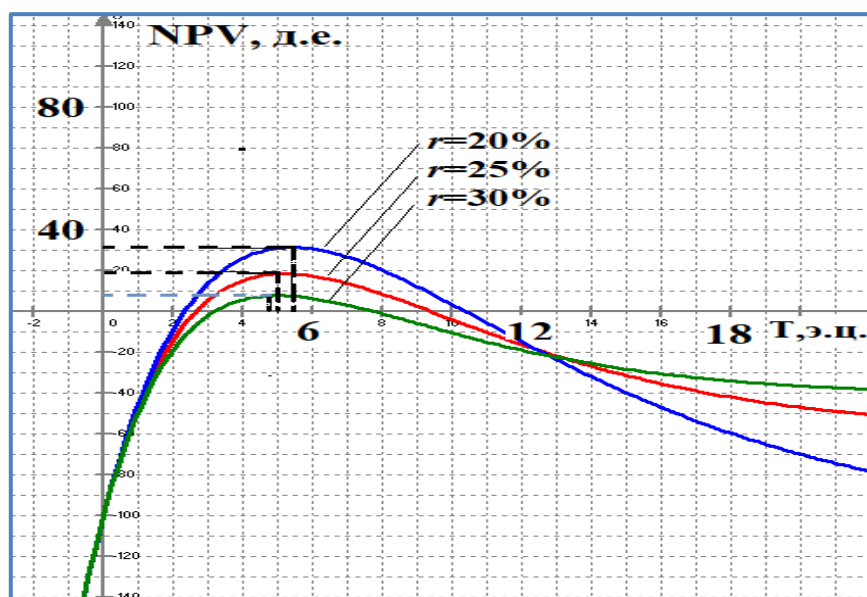


Рисунок – Зависимости $NPV(T)$ при $r = 15, 20, 60$

На рисунке представлены зависимости $NPV(T)$, полученные по формуле (3) при указанных выше сценариях. Из рисунка, например, видно, что при различных значениях ставки r изменяются как абсциссы (потенциальные моменты реинвестиций), так и ординаты (инвестиционный потенциал проекта) точек максимума кривых, что дает аналитику важную информацию о влиянии параметра r (а также других параметров из формулы (3)) на NPV изучаемого инвестиционного проекта, а также становится объективным обоснованием для принятия инвестиционных решений.

В данной работе показано, что применение автоматизированных средств анализа математических моделей-формул позволяет аналитикам оперативно получать информацию, существенную для обоснования принимаемых инвестиционных решений в инвестиционных проектах с выраженным жизненным циклом. Указанный инструментарий применим при анализе инвестиционных проектов различного содержания [8], в том числе в условиях ситуационных центров [9] социально-экономического развития предприятий и территорий.

Список использованных источников

1. Моделирование производственно-инвестиционной деятельности фирмы: учебное пособие для студентов высших учебных заведений / Г.В. Виноградов, Т.С. Булышева, Е.Ю. Дорохина [и др.]; под редакцией Г.В. Виноградова. – М.: ООО «Издательство «Юнити-Дана», 2002. – 319 с. – EDN: VCQUZZ.
2. Ильин, В.А. Математический анализ в 2-х ч. учебник для вузов / В.А. Ильин, В.А. Садовничий, Б.Х. Сендов. – 4-е изд. – М.: Юрайт, 2026. – 324 с. – Текст: электронный. – URL: <https://urait.ru/bcode/584713> (дата обращения: 19.04.2026).
3. Медведев, А.В. Автоматизированная поддержка принятия оптимальных решений в инвестиционно-производственных проектах развития социально-экономических систем / А.В. Медведев. – М.: ИД «Академия Естествознания», 2020. – 200 с. – DOI 10.17513/np.421. – EDN: INAOUX.
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018617155; Российская Федерация. Генерализатор и компоновщик программного обеспечения поддержки принятия решений в ситуационных центрах социально-экономического развития: №2018615787: заявл. 22.05.2018: опубл. 19.06.2018 / А.В. Медведев, М.Н. Рослов, А.С. Ухов. – EDN: YUBWXA.
5. Медведев, А.В. Об эффективном инструментари анализа экономических систем // А.В. Медведев // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – №11-5. – С.763-766. – EDN: TANA FN.
6. Муканова, Р.А. Применение современных цифровых ресурсов Geogebra и Desmos на уроках математики / Р.А. Муканова, Л.Н. Карасева // Актуальные проблемы методики обучения информатике и математике в современной школе: материалы международной научно-практической интернет-конференции. – М.: МПГУ, 2023. – С.381-391. – EDN: CYJPB.
7. Математический и численный анализ эффективности инвестиционного проекта с выявлением его жизненного цикла / А.Г. Киренберг, А.В. Медведев, Е.В. Прокопенко, Я.В. Славолюбова // Вестник Алтайской академии экономики и права. – 2022. – №6-2. – С.256-262. – EDN: AQGFJJ
8. Тимофеева, Н.А. К автоматизированному инструментарию анализа эколого-экономической эффективности инвестиционных проектов / Н.А. Тимофеева,

Е.В. Гончарова, У.В. Петренко // Ресурсосберегающие технологии в контроле, управлении качеством и безопасности: Сборник научных трудов XIV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2025. – С.283-286. – EDN: DZYDLG.

9. Семенкин, Е.С. Информационно-аналитическая система оперативной экспертной поддержки принятия решений при управлении социально-экономическим развитием предприятий и территорий / Е.С. Семенкин, А.В. Медведев // Здоровье – основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения. – 2021. – Т.16, №4. – С.1548-1557. – EDN: YTSUSH.

AUTOMATED ANALYSIS OF AN INVESTMENT PROJECT WITH A LIFE CYCLE BASED ON A MODEL-FORMULA USING A GRAPH ANALYZER

A.Yu. Sokolova, D.A. Popova, V.A. Ryazantseva

*Kemerovo State University,
Kemerovo, Russia*

This article examines automated performance evaluation of investment and production projects using a formula model that identifies the project life cycle. The model can be analyzed using any parametric graph analyzer, allowing the calculation results to be used for operational support of investment decisions at both the enterprise and economic region levels.

Keywords: investment project, economic efficiency assessment, amortization, life cycle of project, parametric graph analyzer.

УДК 621:631.331

ОБОСНОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ТУКОВЫХ СОШНИКОВ ПРОПАШНЫХ СЕЯЛОК

М.А. Терёхин¹, А.Н. Калабушев², А.В. Яшин², Ю.А. Епланов²

¹ АО «Радиозавод», г. Пенза, Россия

² Пензенский государственный аграрный университет, г. Пенза, Россия

В статье обосновано направление совершенствования конструкций туковых сошников пропашных сеялок для работы по ресурсосберегающим технологиям. Показано, что килевидные и двухдисковые сошники не всегда обеспечивают стабильную глубину хода в условиях пожнивных остатков. В качестве перспективного решения предложено использование анкерных туковых сошников на примере сеялки Equalizer, где удобрения вносятся ниже уровня семян, что исключает химический ожог и повышает эффективность их использования.

Ключевые слова: пропашная сеялка, туковый сошник, анкерный сошник, минимальная обработка почвы, нулевая обработка почвы, ресурсосберегающие технологии, внесение минеральных удобрений.

В современных ресурсосберегающих технологиях возделывания пропашных культур, в частности при минимальной и нулевой обработке почвы, важное значение имеет качественное внесение минеральных удобрений при посеве. Наличие на поверхности поля пожнивных остатков предъявляет повышенные требования к проходимости и заглубляющей способности туковых сошников. Килевидные и двухдисковые сошники, устанавливаемые на большинстве пропашных сеялок в качестве опционного оборудования, в таких условиях не всегда обеспечивают стабильную глубину хода [1, 2].

На наш взгляд, перспективным направлением является оснащение сеялок, ориентированных для посева по минимальной технологии, анкерными туковыми сошниками. Подобное конструктивное решение реализовано, в частности, на сеялке Equalizer, которая получила широкое распространение в системах прямого и минимального посева благодаря своей надежности и точности [3]. Общий вид высевальной секции пропашной сеялки Equalizer с анкерным туковым сошником представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Общий вид высевальной секции пропашной сеялки

Equalizer с анкерным туковым сошником

Принцип работы анкерного тукового сошника заключается в следующем. Анкер, выполненный в виде клиновидной части с долотом, заглубляется в почву на заданную величину, как правило, на глубину 10...12 см. По мере движения сошника долото формирует борозду для размещения удобрений. Через тукопровод, интегрированный в стойку сошника, минеральные удобрения подаются на дно образованной борозды. Следом за анкером установлен зубчатый диск, который частично заделывает борозду с удобрениями, предотвращая их контакт с семенами. Позади анкерного сошника по ходу движения агрегата располагается двухдисковый высевальной сошник сеялки. Он образует борозду для семян, размещая их на глубину

5...6 см, непосредственно над слоем внесенных удобрений. Такое пространственное разделение семян и удобрений по глубине и горизонтальной плоскости исключает химический ожог семян при прорастании, поскольку основная доза удобрений размещена ниже семян. Завершающим элементом высевающей секции служат заделывающие колеса, которые заваливают семенную борозду рыхлой почвой.

Схема размещения семян и удобрений при работе сеялки Equalizer с анкерным туковым сошником представлена на рисунке 2. Такое расположение способствует быстрому доступу развивающейся корневой системы проростка к элементам питания, повышает коэффициент использования удобрений и снижает их потери от вымывания и выветривания.

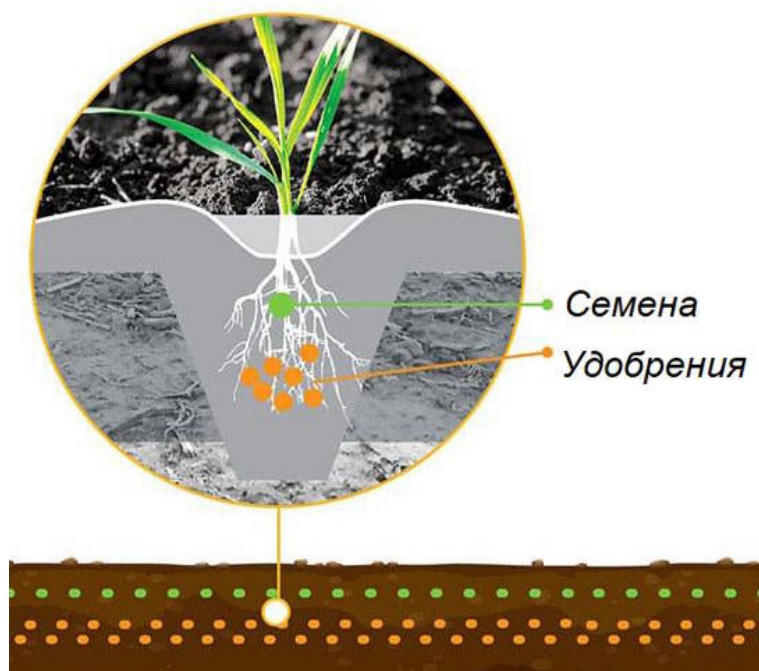


Рисунок 2. Схема размещения семян и удобрений сеялкой

Equalizer с анкерным туковым сошником

Ввиду перспективности применения анкерных сошников для внесения минеральных удобрений при посеве пропашных культур по минимальной технологии, предлагается провести литературный и патентный обзор аналогичных отечественных конструкций.

Известна конструкция долотообразного подкормочного ножа культиватора РКТ для междурядной обработки почвы (рисунок 3), предназначенного для рыхления и внесения в почву минеральных удобрений. Подкормочный нож состоит из долотообразного анкера 1 и закрепленного за ним тукопровода 3, при этом долотообразный анкер размещается на раме культиватора жестко посредством корпуса 2 и стремянок. К корпусу долотообразный анкер крепится посредством двух болтов. На корпусе имеется несколько отверстий, служащих для изменения глубины внесения в почву минеральных удобрений путем перестановки двух крепежных болтов [4].

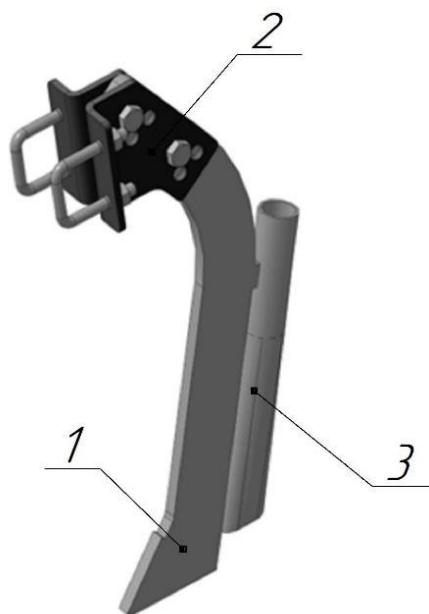


Рисунок 3 – Конструкция подкормочного ножа:
1 – анкер; 2 – корпус; 3 – тукопровод

К недостаткам подкормочного ножа культиватора РКТ для междурядной обработки почвы следует отнести:

- отсутствие предохранительного устройства, т.к. жесткое крепление рабочего органа к раме не уберегает от поломок элементы его конструкции при встрече долотовидного анкера с препятствием в почве;
- высокую трудоемкость перенастройки глубины внесения минеральных удобрений, требующую отворачивания, перестановки и заворачивания двух крепежных болтов.

Известен анкерный сошник по пат. РФ №125017 (рисунок 4), который содержит бороздообразователь в виде удлиненной пластины 1 с изгибом в срединной части и с прямолинейными нижней и верхней частями. Нижняя часть пластины 1 выполнена с клиновидным расширением, образующим остроугольный нож 2, вершина режущего угла которого направлена в сторону движения сошника. Контур одной стороны режущего угла образован нижним торцом пластины, а контур другой его стороны образован скосом пластины. Этот скос сопряжен с продольной, ориентированной в сторону направления движения сошника гранью через установочный паз 3 для направляющего 4, смонтированного на пластине 1 над ножом 2. Направитель 4 через раструб соединен с материалопроводом и предназначен для подачи семян в посевную борозду, формируемую ножом 2, как его режущим углом, так и поверхностями пластины 1 [5].

К недостатку анкерного сошника по пат. РФ №125017 можно отнести отсутствие возможности настройки глубины высева семян и минеральных удобрений на самом сошнике, что ограничивает его применение в конструкции пропашных сеялок и культиваторов-растениепитателей, т.к. их сошники должны обеспечивать возможность размещения гранулирован-

ных минеральных удобрений на различную глубину относительно глубины размещения семян или корневой системы растений.

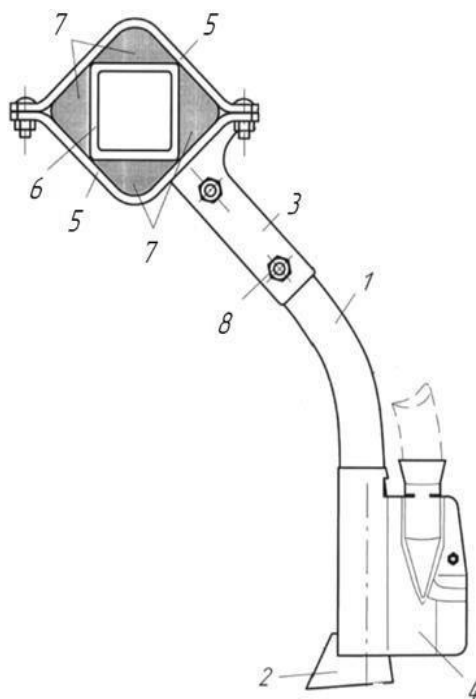


Рисунок 4 – Сошник анкерный по пат. РФ №125017:

1 – пластина; 2 – нож; 3 – паз установочный; 4 – направлятель; 5 – скоба;
6 – брус рамы сеялки; 7 – эластомер; 8 – крепежные элементы

Известна конструкция анкерного сошника для пропашных сеялок, основным элементом которого является долотовидный анкер 1 с напайными твердосплавными пластинами 2 (рисунок 5). За анкером 1 расположен туконаправитель 3, который крепится к анкеру 1 посредством болта 4, и обеспечивает подачу гранулированных туков на дно формируемой анкером борозды. Крепление сошника к брусу 11 рамы сеялки осуществляется посредством кронштейна 7, прижимной скобы 8 и эластомеров 9, выполняющих роль демпфера. Для обеспечения необходимой глубины хода сошника предусмотрены регулировочные отверстия 6, перестановкой болтов 5 в которые можно изменить положение анкера 1 по вертикали относительно бруса 11 рамы сеялки [6].

Недостатком данного сошника является высокая трудоемкость регулировки его заглубления, требующая демонтажа анкера и двух крепежных болтов.

На основании вышесказанного сделан вывод, что для повышения эффективности возделывания подсолнечника требуется совершенствование туковых сошников пропашных сеялок, в частности разработка анкерных сошников с возможностью регулировки глубины внесения удобрений, наличием предохранительных механизмов, что позволит обеспечить стабильную глубину внесения при посеве по ресурсосберегающим технологиям.

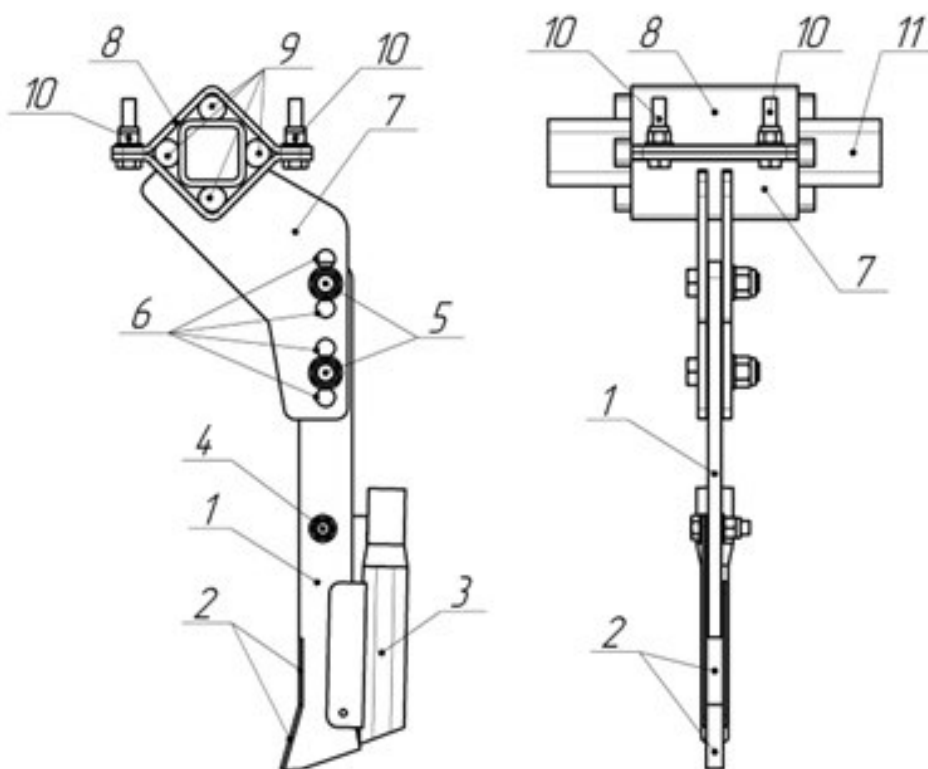


Рисунок 5. Туковый анкерный сошник пропашной сеялки:

- 1 – анкер долотовидный; 2 – пластина твердосплавная;
 3 – туконаправитель; 4, 5, 10 – болт; 6 – отверстие регулировочное;
 7 – кронштейн; 8 – скоба прижимная; 9 – эластомер; 11 – брус рамы сеялки

Список использованных источников

1. Руденко, Н.Е. Сеялки для посева семян пропашных культур / Н.Е. Руденко. – Ставрополь: Издательство «АГРУС», 2005. – 72 с. – ISBN 5-9596-0171-0. – EDN ULMUBZ.
2. Анализ конструкций пропашных сеялок / В.И. Хижняк, П.С. Мальцев, В.А. Таранов [и др.] // Вестник аграрной науки Дона. – 2020. – № 4(52). – С. 42-52. – EDN CHGCAS.
3. Сеялка Equalizer для технологии MINI-TILL [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://tecprofi.ru/product/seyalka-min-till-tine-seeders>
4. Культиватор для междурядной обработки почвы модели: РКТ и РК. Руководство по эксплуатации / ООО «Техника Сервис Агро», г. Воронеж, 2019. – 42 с.
5. Патент на полезную модель № 125017 U1 Российская Федерация, МПК A01C 7/20. Сошник: № 2012139554/13: заявл. 14.09.2012: опубл. 27.02.2013 / Е. В. Наумов, Е. В. Крейцберг; заявитель Общество с ограниченной ответственностью группа предприятий «Сибзавод-Агро». – EDN DMDYZQ
6. Терехин, М.А. Разработка конструкции тукового анкерного сошника для пропашной сеялки / М.А. Терехин // Техническое обеспечение инновационных технологий в АПК: сборник научных статей Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию образования агрономеханического факультета (Минск, 30–31 октября 2025 года). – Минск: БГАТУ, 2025. – С. 97–100.

JUSTIFICATION OF THE DIRECTION FOR IMPROVING THE DESIGNS OF FERTILIZER COULTERS FOR ROW CROP DRILLS

M.A. Terekhin¹, A.N. Kalabushev², A.V. Yashin², Yu.A. Yeplanov²

¹*JSC Radiozavod, Penza, Russia*

²*Penza State Agricultural University, Penza, Russia*

The article substantiates the direction for improving the designs of fertilizer coulters for row crop drills intended for operation under resource-saving technologies. It is shown that keel-type and double-disc coulters do not always ensure a stable working depth under conditions of abundant crop residues. As a promising solution, the use of anchor-type fertilizer coulters is proposed, exemplified by the Equalizer drill, where fertilizers are placed below the seed level, thus preventing chemical burns and increasing the efficiency of fertilizer use.

Keywords: row crop drill, fertilizer coulters, anchor coulters, minimum tillage, no-till, resource-saving technologies, mineral fertilizer application.

УДК 004.032.26

ОБЗОР МЕТОДОВ НЕЙРОСЕТЕВОЙ 3D-РЕКОНСТРУКЦИИ НА ОСНОВЕ NERF И 3D GAUSSIAN SPLATTING В СОВРЕМЕННОЙ ФОТОГРАММЕТРИИ

К.А. Тимаков

*МИРЭА – Российский технологический университет,
г. Москва, Россия*

В статье представлен обзор методов нейросетевой 3D-реконструкции, основанных на архитектурах Neural Radiance Fields (NeRF) и 3D Gaussian Splatting (3DGS), в контексте современных фотограмметрических рабочих процессов. Рассматриваются математические основы, алгоритмические особенности обучения и визуализации, а также интеграция указанных методов с классическими Structure from Motion (SfM) и плотным сопоставлением изображений (MVS). Проводится сравнительный анализ по ключевым метрикам: геометрическая точность, вычислительная сложность, требования к памяти и применимость в прикладных задачах фотограмметрии. Рассматриваются ограничения рассматриваемых подходов при работе с разреженными наборами данных, отсутствием текстуры и необходимостью извлечения явных меш-моделей.

Ключевые слова: Neural Radiance Fields, Structure from Motion фотограмметрия, 3D-реконструкция, структура из движения, объёмный рендеринг.

Классическая фотограмметрия опирается на методы Structure from Motion (SfM) и Multi-View Stereo (MVS) для восстановления трёхмерной геометрии и текстур объектов по набору изображений со всех ракурсов [1]. Данные подходы обеспечивают высокую геометрическую точность и генерацию явных полигональных моделей, совместимых с промышленными

САПР и ГИС. Однако традиционные последовательности этапов демонстрируют ограничения при работе со сложными оптическими свойствами поверхностей, такие как прозрачные, глянцевые или зеркальные материалы. Также проблемы возникают при необходимости создания новых фотореалистичных ракурсов, данных о которых нет. В период 2020–2024 гг. в компьютерном зрении сформировалось несколько направлений позволяющих сформировать альтернативные представления сцены. К таким направлениям относятся метод нейросетевого радиансного поля (Neural Radiance Fields, NeRF) [2], и распределение 3D-гауссианов (3D Gaussian Splatting, 3DGS) [3].

Метод Neural Radiance Fields (NeRF)

Архитектура NeRF представляет сцену в виде неявной функции, параметризованной многослойным перцептроном (MLP). Входными данными сети являются координаты точки в пространстве (x, y, z) и направление взгляда (θ, ϕ) (рис. 1).

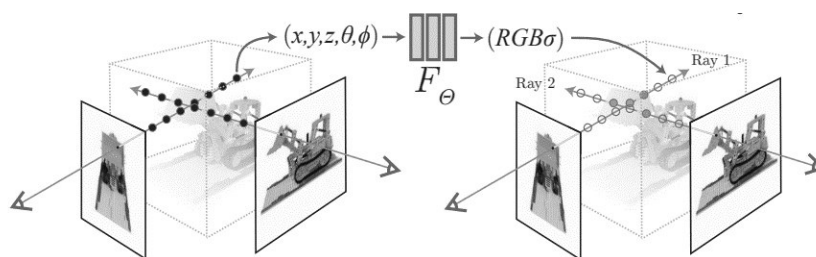


Рисунок 1 – Представление работы метода NeRF

На выходе сеть предсказывает объёмную плотность σ и вектор цвета c , зависящий от направления наблюдения. Для кодирования высокочастотных деталей применяется позиционное кодирование с синусоидальными функциями [2]. Рендеринг изображения осуществляется посредством объёмного рендеринга: вдоль каждого луча камеры выбираются дискретные точки, вычисляются их цветовые и плотностные характеристики, после чего выполняется численное интегрирование с учётом закона Бугера–Ламберта–Бера. Оптимизация происходит за счет минимизации ошибки реконструкции между синтезированными и исходными изображениями с использованием градиентного спуска.

Для использования NeRF требуется предварительное определение матриц внешнего распределения в пространстве камер. Стандартным решением является использование результатов работы в фотограмметрических приложениях, такие как COLMAP или Agisoft Metashape для определения позиций и направлений камер в пространстве [1]. В качестве преимущества метода NeRF можно выделить высокую фотореалистичность сгенерированных ракурсов и объектов, корректное моделирование эффектов преломления, отражения и текстур материалов. Также стоит выделить отсутствие необходимости в явном построении геометрии на этапе обучения модели. В качестве ограничений модели можно выделить высо-

кую вычислительной стоимостью: обучение модели для создания сцены стандартного размера требует от 6 до 48 часов на графическом вычислителе, а рендеринг одного кадра без оптимизации занимает от 0.5 до 2 секунд, что ведет к низкой скорости визуализации. Извлечение мешей требует дополнительных этапов, таких как алгоритм «марширующих кубиков», применяемый к полю плотности, что приводит к потере детализации и увеличению времени постобработки сцены.

Метод 3D Gaussian Splatting (3DGS)

Архитектура 3D Gaussian Splatting использует явное параметрическое представление сцены в виде набора анизотропных 3D-гауссианов. 3D-гауссиан – это параметрический примитив, являющийся базовым элементом явного представления сцены в архитектуре 3D Gaussian Splatting. Математически он соответствует трёхмерному анизотропному нормальному распределению и полностью задаётся набором оптимизируемых параметров (рис. 2).

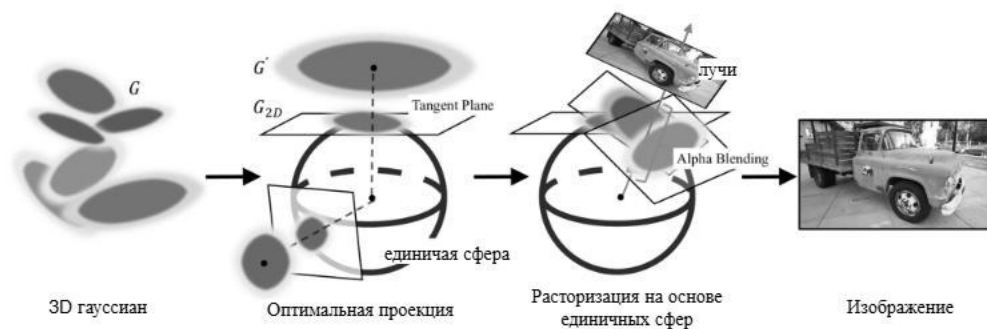


Рисунок 2 – Представление этапов рендеринга 3D Gaussian Splatting

Каждая гауссиана характеризуется центром (координаты), ковариационной матрицей (определяющей форму и ориентацию), значением непрозрачности α и сферическими гармониками для кодирования угловой зависимости цвета [4]. Инициализация гауссианов выполняется на основе разрежённого облака точек, полученного из SfM. В процессе обучения применяются адаптивные операции увеличения плотности: добавление новых гауссианов в областях высокой ошибки реконструкции и разделение крупных гауссианов для повышения детализации. Конечный рендеринг осуществляется через дифференцируемый алгоритм α -блендинга. Далее в реальном времени выполняется сортировка и накопление цветовых значений вдоль луча [3].

3D Gaussian Splatting демонстрирует снижение вычислительных затрат по сравнению с NeRF в несколько раз. Так, обучение стандартной сцены занимает от 15 до 40 минут на современных графических вычислителях, а итоговая визуализация достигает разрешения 1080p и частоту кадров свыше 100 кадров в секунду. При использовании в фотограмметрических приложениях метод 3DGS сохраняет совместимость с классическими методами SfM, используя внешние данные ориентаций камер для калиб-

ровки начального распределения примитивов. Метод обеспечивает высокое качество реконструкции объектов, сохраняя их текстуры, корректно обрабатывает сложные оптические свойства. Недостатками метода можно выделить повышенное требование к оперативной памяти (от 2 до 8 ГБ для сцен среднего размера). Отсутствие прямой генерации топологически корректных меш-моделей без дополнительных процедур извлечения поверхности [5].

Сравнительный анализ в контексте фотограмметрии

Сравнение методов NeRF и 3D Gaussian Splatting рассматривается по четырём основным критериям, важных при решении фотограмметрических задач. По геометрической точности оба метода уступают классическим MVS-алгоритмам при прямом извлечении мешей. NeRF генерирует непрерывное поле плотности, что позволяет получать более гладкие поверхности, но требует пороговой обработки. 3DGS предоставляет дискретное облако примитивов, конвертация которого в полигональную модель сопровождается артефактами на границах объектов. По вычислительной эффективности 3DGS превосходит NeRF в 5–10 раз на этапах обучения и визуализации, что делает его более пригодным для оперативной обработки больших наборов изображений. По требованиям к памяти NeRF использует компактную параметризацию MLP (5–50 МБ), тогда как 3DGS хранит миллионы гауссианов, повышая потребление оперативной памяти до нескольких гигабайтов, что ограничивает масштабирование на сцены городского уровня без сегментации. По интеграции с фотограмметрическим ПО оба метода требуют предварительной оценки камер через SfM. Современные исследования направлены на совместную оптимизацию геометрии и радиометрических параметров, а также на разработку гибридных представлений, объединяющих явную геометрию MVS с нейросетевым кодированием текстуры [5].

Методы нейросетевой 3D-реконструкции на базе NeRF и 3D Gaussian Splatting формируют альтернативный подход к традиционной фотограмметрии, смещая акцент с явной геометрической реконструкции на фотореалистичное радиансное моделирование. Метод NeRF позволяет добиться высокого качества создания ракурсов и оптимизированное хранение сгенерированных данных, но взамен отличается высокой вычислительной нагрузкой на систему и сложностью извлечения полигональных моделей для дальнейшей работы с ними. 3D Gaussian Splatting позволяет существенно ускорить обучения и визуализации объектов, но при этом имеет высокие требования к памяти и ограничения при прямом применении в задачах, требующих точных меш-моделей. Оба рассмотренных метода могут быть интегрированы в фотограмметрические приложения через предварительную оценку положения и свойств камер средствами SfM. Практическое внедрение нейросетевых подходов в промышленную фотограмметрию требует решения проблем масштабирования, стандартизации экспорта в форматы CAD/GIS и повышения устойчивости к разреженным и однотонным текстурам.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Schonberger J. L., Frahm J.-M. Structure-from-Motion Revisited // 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Las Vegas, NV, USA: IEEE, 2016. С. 4104–4113.
2. Mildenhall B., Srinivasan P. P., Tancik M., et al. NeRF: Representing Scenes as Neural Radiance Fields for View Synthesis // Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV). 2020. P. 405–421.
3. Kerbl B., Kopanas G., Leimkühler T., Drettakis G. 3D Gaussian Splatting for Real-Time Radiance Field Rendering // ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH). 2023. Vol. 42, No. 4. Art. 139.
4. Huang, L., Bai, J., Guo, J., Li, Y., & Guo, Y. On the error analysis of 3d gaussian splatting and an optimal projection strategy // 2024
5. Zhong, C., Shi, L., Chen, H., Sun, T., Zhao, H., Yuan, B., & Li, C. Tidegs: Scalable training of over one billion 3d gaussian splatting primitives via out-of-core optimization // 2026

REVIEW OF 3D NEURAL NETWORK RECONSTRUCTION METHODS BASED ON NERF AND 3D GAUSSIAN SPLATTING IN MODERN PHOTOGRAMMETRY

K.A. Timakov

*MIREA – Russian Technological University,
Moscow, Russia*

The article provides an overview of 3D neural network reconstruction methods based on Neural Radiance Fields (NeRF) and 3D Gaussian Splatting (3DGS) architectures in the context of modern photogrammetric workflows. The mathematical foundations, algorithmic features of learning and visualization, as well as the integration of these methods with classical Structure from Motion (SfM) and dense image matching (MVS) are considered. A comparative analysis is conducted on key metrics: geometric accuracy, computational complexity, memory requirements, and applicability in photogrammetry applications. The limitations of the considered approaches when working with sparse datasets, the lack of texture, and the need to extract explicit mesh models are considered.

Keywords: *Neural Radiance Fields, Structure from Motion photogrammetry, 3D reconstruction, structure from motion, volumetric rendering.*

УДК 658.5:659

ВНЕДРЕНИЕ ПРИНЦИПОВ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА В СФЕРУ РАЗМЕЩЕНИЯ НАРУЖНОЙ РЕКЛАМНОЙ ПРОДУКЦИИ

А.А. Тришин, М.Р. Тихонов

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, Россия*

Статья посвящена исследованию возможности применения концепции бережливого производства, зародившейся в промышленном секторе, в сфере оказания

услуг – на примере процесса размещения наружной рекламы. Анализируются исторические предпосылки становления философии бережливого производства и её базовые принципы: определение ценности для клиента, построение потока создания ценности, организация непрерывного потока, внедрение вытягивающей системы и стремление к совершенству. На основе этих принципов автором предлагается адаптация конкретных методов и инструментов бережливого производства (таких как картирование потока создания ценности – VSM, анализ потерь, стандартизация работ, цикл PDCA) к специфике рекламного бизнеса. Целью работы является разработка практических подходов для устранения потерь, повышения эффективности, снижения издержек и увеличения ценности услуги для заказчика в условиях высокой конкуренции на рынке наружной рекламы.

Ключевые слова: бережливое производство, размещение наружной рекламы, поток создания ценности, оптимизация бизнес-процессов, устранение потерь.

Разработка концепции бережливого производства в 1960-х годах и окончательное становление её теоретической части в 1980-х годах, благодаря работам Джона Крафчика, позволила шагнуть вперёд множеству производств по всему миру и дала толчок дальнейшему развитию и совершенствованию науки о качестве, тесно встроившись в её постулаты. Новая эпоха перехода от времени массового производства к времени бережливого производства, привела в своей реализации к новому витку необходимости улучшения качества продукции или услуг, повышения конкурентоспособности.

В своей сути бережливое производство [1-2] нацелено на улучшение процессов именно выпуска продукции, более чем на оказание услуг. Но тем не менее применение и внедрение бережливого производства в процессе размещения наружной рекламы тоже возможно, и многие методы и инструменты применимы.

Главное, что в философии бережливого производства, лежит мысль о том, что бережливое производство это не сколько набор инструментов, а скорее принципиально новая культура организации процесса, стиль управления и мышления. Решающую роль во внедрении принципов бережливого производства возлагается на человеческий фактор, люди составляют самую важную часть в ходе процесса размещения наружной рекламы.

Внедрение принципов бережливого производства в процесс размещения наружной рекламы потребует под собой высокую нагрузку на персонал организации, предполагает под собой определённые трудности, а именно тщательную проработку инструментария бережливого производства для применения и интеграции его в процесс размещения наружной рекламы.

В начале следует рассмотреть основные принципы бережливого производства. Первым принципом является определение ценности продукта с точки зрения клиента. Рассматривая этот принцип через призму наружной рекламы, сразу можно выделить, что в своей основе наружная реклама, как и любая реклама является клиентоориентированной, не только на конечно-

го потребителя, но и на своего заказчика, ставя основной своей целью именно результативность рекламы, и увеличение её эффективности при снижении затрат. В ходе определения ценности продукта, а в случае процесса размещения наружной рекламы именно услуги, стоит определить какие методы бережливого производства возможно внедрить на этом этапе.

Вторым ключевым принципом бережливого производства является, определение потока создания ценности. В процессе размещения наружной рекламы, поток создания ценности стартует определённо от той аудитории которой необходимо донести информацию, предоставленной заказчиком услуги размещения наружной рекламы, всеми доступными методами, существующими на данный момент и разрешёнными законами Российской Федерации. Основным моментом в ходе создания карты потока создания ценности в рамках процесса размещения наружной рекламы, на который нужно направить основные усилия, является именно создание прочной связей между выходом процесса размещения наружной рекламы – потребителями и входом – заказчиками. Во многих случаях, подходы и видение как и где нужно размещать рекламу, какого вида она будет, и какое содержание будет нести, зачастую у заказчика и конечного потребителя расходится, что напрямую влияет на результативность, а за ней и на эффективность размещения наружной рекламы.

Организации предоставляющей услугу по размещению наружной рекламы, прежде всего в рамках этого принципа бережливого производства, необходимо донести своё видение и информацию, основанную на фактах до заказчика, предпочитая качество размещения наружной продукции на специально обозначенных для этого местах, а не хаотичным количественным подходом, какой существует в данный момент в большинстве организаций. Исходя из выше сказанного, разработка карты потока создания ценности, позволит решить одну из самых главных проблем процесса размещения наружной рекламы, а именно отсутствие конкретного результата.

Следующим, и третьим по счёту принципом бережливого производства является, организация непрерывного потока оказания услуги. Этот принцип в сфере наружной рекламы, прямо вытекает из второго принципа – карты потока создания ценности. Без выполнения этого постулата, останется главная проблема процесса наружной рекламы, отсутствие результата, что и по мнению заказчика, является именно просчётами больше организации, чем собственных требований заказчика, и целей, которые перед собой ставит заказчик, обращаясь за помощью в оказании услуги по размещению наружной рекламы. Создание непрерывного потока оказания услуги в ходе размещения наружной рекламы, позволит создать устойчивый процесс, который будет возможно непрерывно совершенствовать и расширять, занимая рынок размещения рекламы.

Четвертым по счёту принципом является создание вытягивающего производства. В данном принципе подробнее стоит остановиться на специфике процесса размещения наружной рекламы. В целом, процесс раз-

мещения наружной рекламы, как и любая услуга, имеет в себе больше признаков именно вытягивающей системы, но вытягивает из процесса размещения услуги не потребитель в лице аудитории, а заказчик. Поэтому необходимо внедрять принципы и инструментарий вытягивающей системы оказания услуги в первую очередь, уделив особое внимание на определении целей заказчика и при необходимости модификации процесса размещения наружной рекламы под эти цели. Это позволит не только повысить результат размещения наружной рекламы, но также и сократить издержки на время выполнения заказа и растрату расходных материалов, позволит снизить себестоимость услуги по размещению наружной рекламы.

Завершающим принципом бережливого производства является стремление к совершенству, а точнее внедрение цикла PDCA [3-4], в основной процесс размещения наружной рекламы, его непрерывное совершенствование. Особенно актуальным это принцип является именно в сфере наружной рекламы, рынок очень конкурентен и предложение порой достаточно сильно превышает спрос на размещение рекламы.

Для реализации принципов бережливого производства, обозначенных выше, стоит рассмотреть методы и инструменты, предназначенные для их реализации которые необходимо применить и внедрить в сферу размещения наружной рекламной продукции.

В ходе определения ценности процесса и создания карты потока создания ценности, для начала нужно понять для чего, и какая цель стоит перед организацией, оказывающей услуг по размещению рекламной продукции. Для этого сначала необходимо деконструировать процесс размещения наружной рекламы, и выделить все наиболее значимые шаги как для организации, а именно самые затратные по времени и расходным материалам, а также процессы, в которых участвует и тратит своё время непосредственно заказчик. Такими процессами станут, запрос на оказание услуги, консультация, определение целей и масштабов заказа, предоставление самой продукции заказчиком, её принятие и оформление соответствующих документов, предоставление отчётов как фото, так и картографического и выплата денежных средств за оказание услуг. В целом, заказчик непосредственно участвует в 30-35% процессах. Во многих процессах, организация и заказчик теряют своё время, на согласования и излишние обработки информации.

Далее необходимо перейти к картированию потока создания ценности или к процессу VSM [5]. В ходе создания карты потока создания ценности, нужно выделять именно подпроцессы, которые забирают время как у организации, так и заказчика, определить их значимость по 3 параметрам, и оптимизировать их, создав тем самым уже на уровне планирования и картирования, конкурентное преимущество по сравнению с другими организациями, предоставляющими услуги по размещению наружной рекламы.

Так же необходимо определить и основные процессы, которые являются наиболее значимыми для заказчика, именно за них заказчик и готов

производить плату и именно их считает наиболее существенными. Такими процессами в сфере размещения наружной рекламы станут, непосредственно размещение рекламы на информационных стендах, и предоставление отчёта заказчику.

Нужно выделить и незначимую работу или потери 1-го рода, те процессы, которые не добавляют ценности процессам, но необходимы организации для осуществления своей деятельности. В этом пункте могут быть выделены процессы приёмки продукции от заказчика, пополнения склада расходных материалов, их распределение между сотрудниками и подготовка задач для них. Для заказчика по ценности они являются не важными, а порой и незаметными.

Завершить анализ необходимо выявлением потерь 2-го рода, а именно бесполезной работой, такой как необходимость согласования договора акта приёмки продукции от заказчика, необходимости проведения излишнего отчёта, и выбора площадки для его отправки заказчику. Эти процессы занимают огромное количество времени, но при этом не являются ценными для организации, и необходимы только для удовлетворения определенных потребностей заказчика на начальном этапе сотрудничества.

Благодаря внедрению методов бережливого производства, возможно повысить качество оказания услуги по размещению рекламной продукции, что позволит выигрывать в конкурентной среде как за счёт повышения качества продукции, так и за счёт снижения себестоимости услуги, посредством сокращения издержек и потерь как материальных, так и временных.

Список использованных источников

1. Кирпичкина, М.А. Применение инструментов бережливого производства на предприятиях / М.А. Кирпичкина, О.В. Новокрещенова // The World of Science Without Borders, 11 февраля 2022 года, 2022. – Р. 578-580. – EDN AEKWZA.
2. Демяхина, Е.В. Бережливое производство как метод повышения эффективности производства на предприятии / Е.В. Демяхина // Теория и практика экономики и предпринимательства: Труды XXI Международной научно-практической конференции, Симферополь-Гурзуф, 18–20 апреля 2024 года. – Симферополь: Издательский дом КФУ им. В.И. Вернадского, 2024. – С. 154-156. – EDN OWOQMG.
3. Душко, И.А. Цикл Деминга (PDCA) и бережливое производство (lean manufacturing): реальные кейсы применения в России / И.А. Душко // Межотраслевые исследования. Безбарьерная среда научной деятельности : Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Казань, 28 ноября 2025 года. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «Аэтерна», 2025. – С. 30-34. – EDN AQZGZO.
4. Ушаков, И.А. Применение комплекса управления конфигурациями согласно циклу PDCA / И.А. Ушаков, В.А. Кравцова // Заметки ученого. – 2023. – № 5-2. – С. 121-126. – EDN MZPMSB.
5. Дудырева, О.А. О разработках карт VSM в концепции «Бережливого производства» / О.А. Дудырева, Л.В. Костюк // Экономический вектор. – 2024. – № 4(39). – С. 22-25. – DOI 10.36807/2411-7269-2024-4-39-22-25. – EDN BNDJIY.

IMPLEMENTATION OF LEAN MANUFACTURING PRINCIPLES IN THE SPHERE OF OUTDOOR ADVERTISING PRODUCT PLACEMENT

A.A. Trishin, M.R. Tikhonov

*National Research University of Electronic Technology,
Moscow, Russia*

This article explores the applicability of lean manufacturing concepts, which originated in the industrial sector, to the service sector, using the outdoor advertising process as an example. It analyzes the historical background of lean manufacturing philosophy and its fundamental principles: defining customer value, building a value stream, organizing a continuous flow, implementing a pull system, and striving for excellence. Based on these principles, the author proposes adapting specific lean manufacturing methods and tools (such as value stream mapping (VSM), waste analysis, work standardization, and the PDCA cycle) to the specifics of the advertising business. The goal of this paper is to develop practical approaches for eliminating waste, improving efficiency, reducing costs, and increasing service value for customers in the highly competitive outdoor advertising market.

Keywords: lean manufacturing, outdoor advertising, value stream, business process optimization, waste elimination.

УДК 621.92

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРЕННЕГО ШЛИФОВАНИЯ С ПРОДОЛЬНОЙ ПОДАЧЕЙ

Н.Ф. Тихонов

*Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова,
г. Чебоксары, Россия*

Практическая значимость заключается в возможности интеграции математического моделирования в системы автоматизированного управления производством, а также в разработке программного обеспечения для прогнозирования и оптимизации внутреннего шлифования с продольной подачей. Такой подход способствует уменьшению наладочных операций и повышению конкурентоспособности машиностроительных предприятий за счет повышения точности обработки и снижения производственных потерь.

Ключевые слова: шлифование, продольная подача, модель, теплоотвод, свойства, данные.

Введение

Внутреннее шлифование с осевой подачей на круглошлифовальных станках представляет собой технологический процесс, направленный на получение высокоточных поверхностей внутреннего диаметра изделий. Особенностью этого процесса является сложное взаимодействие абразивного инструмента и обрабатываемого материала, что обуславливает необ-

ходимость детального анализа физических явлений, протекающих в зоне резания. В современных условиях повышения требований к качеству обработки и эффективности производства возникает потребность в разработке математических моделей, способных описать и прогнозировать поведение системы при различных режимах работы [1, 2].

Цель исследования – задачи по разработке и проверке моделей, анализу параметров и оптимизации процесса внутреннего шлифования с продольной подачей.

Анализ параметров управления циклом обработки

Ключевым элементом управления процессом является выбор параметров обработки, таких как скорость подачи, глубина резания и скорость вращения шлифовального круга. Эти параметры взаимосвязаны и совместно определяют характеристики зоны резания, динамику взаимодействия абразивных зерен с поверхностью и, в конечном итоге, показатели качества обработанной детали и производительности технологического цикла.

Скорость подачи оказывает непосредственное влияние на скорость перемещения инструмента вдоль внутренней поверхности детали. Увеличение подачи способствует повышению производительности за счет сокращения времени обработки, однако при этом возрастает нагрузка на абразивный круг, что может привести к усиленному износу и ухудшению качества поверхности из-за увеличения глубины микронеровностей и появления термических дефектов. В свою очередь, слишком малая скорость подачи снижает эффективность производства, не обеспечивая соответствующего улучшения качества, что делает важным баланс между быстротой и степенью деформации.

Глубина резания определяет толщину слоя материала, снимаемого за один проход абразивных зерен. Увеличение глубины резания увеличивает усилия резания и тепловыделение, что может вызывать деформации и нарушение геометрии поверхности при недостаточном контроле процесса. Моделирование позволяет выявить границы безопасных режимов резания, в которых сохраняется стабильность шлифовального круга и минимален риск возникновения микротрещин или заусенцев. Малые глубины резания обеспечивают более высокое качество поверхности, но требуют увеличения количества циклов обработки, влияя на общее время и затраты.

Скорость вращения шлифовального круга оказывает влияние на кинематику контакта и эффективную скорость резания. Увеличение скорости способствует уменьшению высоты срезаемого слоя и снижению сил трения, что положительно влияет на шероховатость обработанной поверхности и снижает термическое воздействие. Однако слишком высокий режим скорости может привести к возрастанию вибраций и сокращению ресурса круга. Оптимальный режим определяется при анализе компромисса между динамической устойчивостью процесса и требованиями к качеству.

Взаимодействие этих параметров носит комплексный характер: при оптимизации необходимо учитывать последствия изменения одного параметра на остальные и на итоговые показатели. Математические модели,

применяющие методы динамического программирования, позволяют прогнозировать и корректировать технологические режимы с учетом накопленного износа инструмента, изменений температуры и текущего состояния поверхности [3, 4]. Такой подход обеспечивает динамическую адаптацию параметров во время обработки.

Проведенный анализ выявил, что наиболее эффективные режимы работы достигаются при соотношениях параметров, обеспечивающих равномерное распределение усилий резания и минимизацию термических деформаций. При этом важной становится возможность изменения параметров в реальном времени, что снижает риск возникновения дефектов и повышает стабильность качества продукции.

Установлено, что снижение скорости подачи в сочетании с оптимальной глубиной резания и скоростью вращения круга повышает качество поверхности и уменьшает износ абразивного инструмента, но требует эффективного управления временем технологического цикла для сохранения производительности. Модели позволяют выявлять такие компромиссные решения, что становится особенно актуально при обработке деталей с высокими требованиями к точности и повторяемости.

Оптимизация этих параметров способствует повышению качества и эффективности.

Оптимизация технологического процесса внутреннего шлифования

Оптимизация параметров обработки позволяет существенно улучшить показатели как производительности, так и качества внутреннего шлифования, снижая износ абразивного инструмента и минимизируя дефекты на поверхности детали. На основе математических моделей разрабатываются алгоритмы, которые автоматически подбирают режимы работы с учетом текущего состояния инструмента и характеристик заготовки, что значительно сокращает время переналадки и упрощает управление процессом.

Одним из эффективных подходов является многоцелевое оптимизирование, при котором одновременно учитываются критерии максимизации скорости съема материала, минимизации шероховатости поверхности и уменьшения теплового воздействия. Решение таких задач реализуется через численные методы оптимизации, например, градиентные методы и эволюционные алгоритмы, позволяющие работать с нелинейными зависимостями и большими объемами исходных данных. Благодаря этим алгоритмам можно определить оптимальные сочетания глубины резания, скорости вращения круга и подачи, при которых достигается минимальный износ круга при сохранении заданной точности обработки.

Адаптивные системы оптимизации, основанные на моделях с динамической обратной связью, позволяют корректировать параметры в режиме реального времени в ответ на изменение условий обработки, таких как повышение температуры в зоне контакта или нарастание вибраций. Это обеспечивает устойчивость процесса и предотвращение аварийных ситуаций, например, возникновения заусенцев или задиров. Внедрение таких

систем позволяет увеличивать ресурс абразивного круга и снижать долю брака.

Методы оптимизации включают прогнозирование износа абразивного круга на основании анализа силовых и температурных характеристик, получаемых с помощью моделирования. Прогнозирование позволяет заранее корректировать параметры обработки, предотвращая резкое ухудшение качества и увеличивая интервал между техническим обслуживанием. В сочетании с моделями термодинамического состояния зоны резания это дает возможность снижать тепловые деформации и контролировать стабильность размеров детали.

Важное направление повышения эффективности – разработка многофакторных критериев оптимизации, учитывающих не только технические параметры, но и экономические показатели: себестоимость обработки, энергозатраты и время на смену инструмента. Оптимизационные алгоритмы способны находить компромиссные решения, обеспечивающие снижение затрат без потери качества, что особенно актуально при серийном производстве.

Таким образом достигается баланс между производительностью и качеством.

Проверка математических моделей аналитическими методами

Проверка математических моделей является важным этапом их применения, поскольку она обеспечивает уверенность в точности и надежности прогнозов, получаемых при моделировании технологического процесса. В ходе проверки аналитическими методами осуществляется сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными, а также с теоретическими значениями, выведенными из классических соотношений механики и термодинамики [5, 6].

Одним из ключевых способов проверки служит анализ предиктивной способности модели в части описания сил резания и распределения температуры в зоне контакта. Для этого сравниваются вычисленные по модельным уравнениям величины усилий с измеренными на испытательных стендах значениями, полученными при различных режимах шлифования. Особое внимание уделяется диапазону режимов, в котором наблюдается устойчивость процесса и повторяемость результатов. При несовпадении величин проводится оценка параметров модели и корректировка исходных данных для достижения прогнозируемой точности [7].

Дополнительно проводится проверка согласованности модели с фундаментальными законами сохранения энергии и импульса. Аналитический расчет баланса тепла и механической работы в контрольном объеме зоны резания служит критерием отсутствия внутренних противоречий в уравнениях. Результаты такого анализа выявляют адекватность представления процессов трения и пластической деформации, а также уровень аппроксимаций, применённых при выводе уравнений.

Особые процедуры посвящены проверке устойчивости решений системы уравнений, что необходимо для применения модели в системах управления процессом. Используются методы линейной и нелинейной ус-

тойчивости, позволяющие определить диапазоны параметров, при которых решения остаются физически реалистичными и численно устойчивыми. Соответствие этим условиям подтверждает возможность использования модели в автоматизированном регулировании [8].

Проверка аналитическими средствами также включает сравнение результатов с эталонными решениями из научной литературы, где описаны упрощённые кейсы процесса шлифования с известными характеристиками. Эта процедура позволяет выявить ограничения моделей и области допустимого применения, что важно для корректной реализации в конкретных технологических условиях.

В дополнение к теоретическим методам производится верификация на основе статистического анализа экспериментальных данных, учитывающего разброс измерений и погрешности оборудования. Анализ чувствительности модели к изменениям входных параметров позволяет выявить наиболее значимые факторы, влияющие на результаты, и сформулировать рекомендации по их контролю в производстве.

Заключение

Результаты проверки подтверждают применимость моделей для управления процессом [1-8].

Список использованных источников

1. Салова, Д.П. Анализ тепловой ситуации при внутреннем шлифовании с продольной подачей / Д.П. Салова, Т.Г. Виноградова, В.А. Аврелькин, П.М. Салов, М.А. Борисов, Н.Ф. Тихонов // Депонированная рукопись № 298-B2013 от 25.10.2013. – ВИНТИ РАН. – 20 с. – EDN UYKBGX.
2. Шлифование взаимосвязанных внутренних поверхностей / Д.П. Салова, Т.Г. Виноградова, Л.В. Селиверстова [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. – 2022. – № 6. – С. 146-148. – EDN SEUFRW.
3. Вожжов, А.А. Оценка деформации тонкостенной детали при ее закреплении на операции внутреннего шлифования / А.А. Вожжов, П.К. Сопин, О.А. Бунин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2025. – № 4(372). – С. 3-8. – DOI 10.33979/2073-7408-2025-372-4-3-8. – EDN KKZFJU.
4. Нагревание и остывание заготовок при внутреннем шлифовании в условиях ограниченной жесткости технологической системы / П.М. Салов, Д.П. Салова, Т.Г. Виноградова [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. – 2018. – № 9. – С. 61-63. – EDN YLHZRJ.
5. Тихонов, Н.Ф. Экспериментальные методы измерения температур при внутреннем шлифовании с продольной подачей / Н.Ф. Тихонов, О.А. Надеждина // Современные машиностроительные системы, технологии и инновации: Сборник научных статей 2-й Международной научно-технической конференции, Воронеж, 06 марта 2026 года. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2026. – С. 491-495. EDN DIXKIH.
6. Тихонов, Н.Ф. Сравнение экспериментальных данных и расчетных моделей теплового режима при внутреннем шлифовании с продольной подачей / Н.Ф. Тихонов // Современные машиностроительные системы, технологии и инновации: Сборник научных статей 2-й Международной научно-технической конференции, Воронеж, 06 марта 2026 года. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2026. – С. 495-499. – EDN DTAPVD.

7. Переверзев, П.П. Моделирование съема металла в зонах реверса в процессе внутреннего шлифования / П.П. Переверзев, А.В. Акинцева // СТИН. – 2017. – № 9. – С. 29-33. – EDN ZHHHAN.

8. Смирнов, В.А. Численный метод решения нелинейной двумерной задачи теплопроводности при шлифовании / В.А. Смирнов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2010. – № 3(27). – С. 23-27. – EDN NQYTVV.

MATHEMATICAL MODELING OF INTERNAL GRINDING WITH LONGITUDINAL FEEDING

N.F. Tikhonov

*I.N. Ulyanov Chuvash State University,
Cheboksary, Russia*

The practical significance lies in the possibility of integrating mathematical modeling into automated production management systems, as well as in the development of software for predicting and optimizing longitudinal internal grinding. This approach helps to reduce setup operations and increase the competitiveness of engineering enterprises by improving processing accuracy and reducing production losses.

Keywords: grinding, longitudinal feed, model, heat sink, properties, data.

УДК 621.92

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВНУТРЕННЕГО ШЛИФОВАНИЯ С ПРОДОЛЬНОЙ ПОДАЧЕЙ

Н.Ф. Тихонов

*Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова,
г. Чебоксары, Россия*

Рассматриваются перспективы развития методов математического моделирования, связанные с внедрением искусственного интеллекта и машинного обучения для адаптивного управления процессом шлифования. Ожидается, что дальнейшее развитие данной области позволит расширить функционал моделей и обеспечить более глубокое понимание физики внутренней обработки, что окажет влияние на качество изготовления сложных деталей в условиях массового и мелкосерийного производства.

Ключевые слова: шлифование, продольная подача, модель, теплоотвод, свойства, данные.

Введение

Внутреннее шлифование с продольной подачей представляет собой процесс обработки внутренних поверхностей изделий с использованием вращающегося абразивного круга и одновременно осуществляемого перемещения инструмента вдоль оси обрабатываемого отверстия. Этот метод

позволяет получать высокоточную и гладкую поверхность внутреннего диаметра, что особенно важно при изготовлении деталей с жесткими требованиями к геометрии и шероховатости, например, в машиностроении и приборостроении [1, 2].

Цель исследования – перспективы методов математического моделирования, анализ параметров и оптимизация процесса внутреннего шлифования с продольной подачей.

Методы математического моделирования технологического процесса

Для исследования процессов внутреннего шлифования применяются методы математического моделирования, обеспечивающие количественное описание и прогнозирование поведения системы в условиях изменяющихся режимов обработки [3]. Основой моделирования служит построение систем уравнений, отражающих основные кинематические и кинетические характеристики технологического процесса. Для реализации таких моделей широко применяются методы численного интегрирования дифференциальных уравнений, позволяющие получать детализированные данные о развитии процесса во времени.

Особое значение в анализе внутренних шлифовальных операций имеет динамическое программирование – метод оптимизации, предназначенный для решения задач управления с несколькими поэтапными решениями. Динамическое программирование позволяет разложить сложную задачу, связанную с выбором оптимального набора технологических параметров, на последовательность более простых подзадач. Этот подход обеспечивает учет изменений состояния системы в процессе обработки, таких как износ шлифовального круга и изменение геометрии поверхности детали, что невозможно при использовании статических моделей.

Методика применения динамического программирования предусматривает определение оптимальных управляющих воздействий по критериям минимизации энергетических затрат, времени обработки или максимизации качества поверхности. Для этого формулируется функционал цели, который представляет собой суммарную оценку эффективности процесса с учетом заданных ограничений на технологические параметры и характеристики станка. Последовательное вычисление оптимальных решений по этапам обеспечивает устойчивость и адаптивность управления.

Дополнительно применяется аналитический контроль корректности моделей, основанный на сравнении расчетных решений с известными теоретическими результатами и экспериментальными данными, полученными в литературе и лабораторных исследованиях [4, 5]. Аналитические методы проверки включают оценку предельных состояний систем уравнений, устойчивости решений и анализ граничных условий, что обеспечивает надежность моделирования и исключает физически невозможные варианты развития процесса.

Использование комбинированного подхода – численного моделирования совместно с динамическим программированием и аналитическим кон-

тролем позволяет сформировать математическую основу для построения адаптивных систем управления внутренним шлифованием с продольной подачей. Такой подход объединяет точность описания физических процессов и эффективность поиска оптимальных решений в условиях многопараметрической среды.

Эти методы позволяют получать оптимальные параметры обработки.

Практическое применение результатов моделирования в машиностроении

Практическое применение моделей позволяет повысить эффективность производства за счет оптимизации технологических режимов обработки без необходимости проведения длительных и затратных экспериментальных испытаний. В машиностроительных цехах при обработке сложных деталей с узкими допусками внедрение разработанных моделей помогло существенно сократить время наладки оборудования, минимизируя количество пробных проходов и снижающее риск дефектов.

Внедрение систем адаптивного управления, основанных на результатах моделирования, позволило оперативно корректировать параметры обработки в режиме реального времени, учитывая текущие изменения состояния абразивного инструмента и особенности обрабатываемого материала. Это повысило стабильность качества поверхности и продлило ресурс дорогостоящих абразивных кругов, что особенно важно в условиях массового и мелкосерийного производства.

Примеры успешного применения моделей можно найти в производстве прецизионных подшипников и гидравлических компонентов, где требуются высокие показатели точности и однородности поверхностей. Использование оптимизационных алгоритмов на основе математического моделирования позволило снизить уровень брака и уменьшить суммарные производственные затраты, благодаря более рациональному распределению времени обработки и своевременной замене инструмента.

Внедрение цифровых двойников технологического процесса, построенных с опорой на разработанные модели, открывает перспективы интеграции внутреннего шлифования в комплексные системы автоматизированного производства. Это позволяет не только автоматизировать контроль качества, но и прогнозировать возможные отклонения, поддерживая высокий уровень производительности без постоянного вмешательства оператора.

Применение математических моделей содействует разработке новых конструктивных решений для оборудования, адаптированных под конкретные задачи обработки. Это обеспечивает повышение общей жесткости и точности станков и улучшает управление тепловыми режимами, что отражается на качестве конечного продукта.

Результаты исследований уже нашли отражение в реальных производственных условиях и доказали свою эффективность. Масштабирование и дальнейшее развитие таких подходов позволит увеличить конкурентоспособность предприятий машиностроительной отрасли. Это способствует развитию технологий внутреннего шлифования.

Перспективы развития методов математического моделирования внутренней обработки

Современные тенденции развития математического моделирования направлены на интеграцию методов искусственного интеллекта и машинного обучения в схемы описания и управления процессами внутреннего шлифования с продольной подачей. В отличие от традиционных моделей, основанных на уравнениях физики и механики, новые подходы используют большие объемы данных, получаемых с сенсоров и контроллеров станков, для выявления скрытых закономерностей и динамического прогнозирования состояния инструмента и качества обработки.

Важное место занимает разработка гибридных моделей, объединяющих физические законы и адаптивные алгоритмы искусственного интеллекта. Такое сочетание позволяет воспроизводить нелинейные и сложно зависящие от условий поведения материалов и абразивного круга более точно, чем традиционные подходы, а также адаптироваться к вариациям технологической среды без необходимости частой перенастройки параметров модели.

Для повышения точности и оперативности прогнозов активно изучаются методы глубокого обучения, в частности сверточные и рекуррентные нейронные сети, способные обрабатывать потоковые данные из систем мониторинга. Они позволяют анализировать распределение вибраций, температуры и деформаций в реальном времени, обеспечивая своевременную корректировку технологических режимов и предупреждение аварийных ситуаций.

Развиваются технологии цифровых двойников – виртуальных копий оборудования и процессов, которые функционируют на основе как физически обоснованных моделей, так и данных, поступающих с реального производства. Цифровые двойники обеспечивают возможность комплексного моделирования технологических циклов, включая прогнозирование износа инструментов и оптимизацию режимов без прерывания основного производственного процесса [6].

Особое внимание уделяется интеграции математического моделирования [7] с системами промышленного Интернета вещей (IIoT) и облачными платформами, что позволяет накапливать, анализировать и использовать данные из различных производственных подразделений в единой цифровой экосистеме. Это обеспечивает масштабируемость и гибкость моделей, а также возможность коллективного обучения систем на основе обобщенного опыта множества станков и условий работы.

Современные разработки направлены на создание автономных систем управления шлифованием с применением методов усиленного обучения, где алгоритмы самостоятельно обучаются оптимальному управлению на основе обратной связи от состояния процесса. Такая автономия открывает новые горизонты в автоматизации комплексных технологических процес-

сов, снижая зависимость от человеческого фактора и увеличивая стабильность качества.

Заключение

Развитие методов численного моделирования сопряжено с усовершенствованием вычислительных средств и алгоритмов, что позволяет моделировать процессы с более высокой степенью детализации и учитывать многофакторные взаимодействия в режиме реального времени. Распараллеливание вычислений и использование специализированных аппаратных средств ускоряет моделирование, делая его применимым непосредственно в производственной среде [1-7].

Список использованных источников

1. Салова, Д.П. Анализ тепловой ситуации при внутреннем шлифовании с продольной подачей / Салова Д.П., Виноградова Т.Г., Аврелькин В.А., Салов П.М., Борисов М.А., Тихонов Н.Ф. // Депонированная рукопись № 298-B2013 от 25.10.2013. – ВИНТИ РАН. – 20 с. – EDN UYKBGX.
2. Шлифование взаимосвязанных внутренних поверхностей / Д.П. Салова, Т.Г. Виноградова, Л.В. Селиверстова [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. – 2022. – № 6. – С. 146-148. – EDN SEUFRW.
3. Переверзев, П.П. Моделирование съема металла в зонах реверса в процессе внутреннего шлифования / П. П. Переверзев, А. В. Акинцева // СТИН. – 2017. – № 9. – С. 29-33. – EDN ZHHNAN.
4. Тихонов, Н.Ф. Экспериментальные методы измерения температур при внутреннем шлифовании с продольной подачей / Н.Ф. Тихонов, О.А. Надеждина // Современные машиностроительные системы, технологии и инновации: Сборник научных статей 2-й Международной научно-технической конференции, Воронеж, 06 марта 2026 года. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2026. – С. 491-495. – EDN DIXKIH.
5. Тихонов, Н.Ф. Сравнение экспериментальных данных и расчетных моделей теплового режима при внутреннем шлифовании с продольной подачей / Н.Ф. Тихонов // Современные машиностроительные системы, технологии и инновации: Сборник научных статей 2-й Международной научно-технической конференции, Воронеж, 06 марта 2026 года. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2026. – С. 495-499. – EDN DTAPVD.
6. Акинцева, А.В. Особенности проектирования цифрового двойника операции внутреннего шлифования с числовым программным управлением / А.В. Акинцева, А.А. Комаров // Будущее машиностроения России: тринадцатая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием): сборник докладов: в 2 т., Москва, 22–25 сентября 2020 года / Союз машиностроителей России, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана. Том 1. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. – С. 34-36. – EDN OMGRHY.
7. Смирнов, В.А. Численный метод решения нелинейной двумерной задачи теплопроводности при шлифовании / В.А. Смирнов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2010. – № 3(27). – С.23-27. – EDN NQYTVV.

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELING METHODS FOR INTERNAL GRINDING WITH LONGITUDINAL FEED

N.F. Tikhonov

*I.N. Ulyanov Chuvash State University,
Cheboksary, Russia*

The prospects for the development of mathematical modeling methods related to the introduction of artificial intelligence and machine learning for adaptive control of the grinding process are being considered. It is expected that further development in this area will expand the functionality of models and provide a deeper understanding of the physics of internal processing, which will have an impact on the quality of manufacturing complex parts in mass and small-scale production.

Keywords: grinding, longitudinal feed, model, heat sink, properties, data.

УДК 631.15.01

БИОРАЗЛАГАЕМЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИЛАКТИДА: ЗАРУБЕЖНЫЙ И ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ОПЫТ

С.К.Фишкина, М.А. Дёгтева

*Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия*

В статье представлен обзор подходов к созданию биоразлагаемых конструкционных материалов на основе полилактида (PLA). Показано, что чистый PLA хрупок и имеет низкую ударную вязкость. Систематизированы два направления модификации: химическая сополимеризация и физическое композитирование. Сополимеризация повышает ударную вязкость в 9–12 раз, а введение природных наполнителей увеличивает прочность на 30% и ускоряет биоразложение до 20–90 дней.

Ключевые слова: полилактид, PLA, биоразлагаемые конструкционные материалы, сополимеризация, композиты.

Ежегодно в окружающую среду попадает более 300 млн тонн пластиковых отходов. В ответ на это развиваются биоразлагаемые полимеры. Полилактид (PLA) – полимер из возобновляемого сырья (кукуруза, сахарный тростник) [1, 4].

PLA обладает прочностью 50–60 МПа, перерабатывается литьём и 3D-печатью. Однако для конструкционных изделий есть два ограничения: хрупкость (удлинение <10%) и неконтролируемая деградация [1, 2].

Цель – систематизировать результаты модификации PLA для конструкционного применения.

Химическая модификация (сополимеризация)

Метод заключается во введении в цепь PLA гибких сегментов (PEG, PCL), которые снижают кристалличность [1]. Результаты (Jietal., 2025): 20% PEG → прочность до 70 МПа, ударная вязкость 7.9 кДж/м². Триблок-сополимеры → ударная вязкость выше в 9–12 раз. Альтернирующие сополимеры → удлинение 331–518%, разложение в компосте и морской воде. Преимущество: нет миграции пластификаторов. Недостаток: высокая стоимость [1].

Композиты с природными наполнителями

Активно развиваются в РФ, удешевляют материал и ускоряют биоразложение. PLA с крахмалом (Демина и соавт., 2024) [3]: Модуль упругости до 3.2 ГПа (40% крахмала). Проблема: несовместимость гидрофобного PLA и гидрофильного крахмала.

PLA с хитозаном (Deminaetal., 2021) [5]: Российский приоритет – привитая сополимеризация в твердой фазе. 4% хитозана → ударная вязкость до 20.63 кДж/м² (+15.7%). PLA с льняным порошком (патент БГТУ, 2025) [2]: Модификация уксусным ангидридом → свойства на 30% выше. Полное разложение за 20–90 дней.

Нанокompозиты и биоразложение

Нанокompозиты [1]: 1% MWCNT → прочность при изгибе 84.3 МПа (+60%). 1% HNT → прочность 85.1 МПа (+62%), удлинение 6.39%.

Биоразложение [1, 3, 4]: Факторы: кристалличность, pH, гидрофильные добавки. PLA + льняной порошок → 100% за 20–90 дней [2]. PLA/PCL 80/20 → частичное разложение в компосте [3].

Заключение

1. Сополимеризация даёт лучшие свойства (вязкость ↑ в 9–12 раз), но дорога [1].

2. Природные наполнители оптимальны для крупнотоннажного производства. Льняной порошок даёт +30% прочности и разложение за 20–90 дней [2, 3, 5].

3. Нанокompозиты с MWCNT повышают прочность до 85 МПа [1].

4. Скорость биоразложения регулируется добавками [1, 3, 4].

Перспективы: масштабирование PLA/хитозан, 3D-печать конструктивных деталей.

Список использованных источников

1. Ji R., Mo F., Liang L. et al. Biodegradable polylactic acid (PLA) copolymer materials // Chemical Engineering Journal. – 2025.
2. Ученые БГТУ запатентовали новую рецептуру биополимера на основе полилактида // БиоТех2030. – 2025.
3. Демина В.А., Ступников А.А., Готовцев П.М. и др. Биоразлагаемые композиционные материалы на основе полилактида и крахмала // Биотехнология. – 2024. – Т. 40. № 6. – С. 66-73.
4. Polymers. 2026. Special Issue: PLA-Based Biodegradable Polymer. – Vol. 18. № 1. – С. 121.
5. Demina T.S., Akopova T.A., Zelenetskii A.N. Materials Based on Chitosan and Polylactide // Polymer Science, Series C. – 2021. – Vol. 63. – P. 219–226.

BIODEGRADABLE STRUCTURAL MATERIALS BASED ON POLYLACTIDE: FOREIGN AND DOMESTIC EXPERIENCE

S.K. Fishkina, M.A.Dyogteva

*Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia*

The article provides an overview of approaches to creating biodegradable structural materials based on polylactide (PLA). It is shown that pure PLA is brittle and has low impact strength. Two modification methods are systematized: chemical copolymerization and physical composite formation. Copolymerization increases the impact strength by 9–12 times, while the introduction of natural fillers increases the strength by 30% and accelerates biodegradation to 20–90 days.

Keywords: *polylactide, PLA, biodegradable structural materials, copolymerization, composites.*

УДК 621.31

БАЗОВАЯ МОДЕЛЬ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА

А.А. Хазиева, Р.Н. Пигилова

*Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия*

Предложена четырёхуровневая модель энергообеспечения с выделением зон ответственности и узлов критичности. Построена матрица «отказ энергоснабжения – последствия для персонала и оборудования». Определены минимально допустимые уровни резервирования для различных функциональных групп потребителей.

Ключевые слова: *энергообеспечение, промышленная безопасность, аварийный режим, надёжность энергоснабжения, производственный риск, электротравматизм, категоричность потребителей.*

На промышленном предприятии система энергообеспечения традиционно рассматривается как вспомогательная инфраструктура. Основное внимание уделяется технологическим процессам, а электропитание воспринимается как нечто само собой разумеющееся – вплоть до возникновения аварии. Однако статистика контрольно-надзорных органов (Ростехнадзор, 2023) показывает устойчивую связь между нарушениями в системе энергообеспечения и тяжёлыми инцидентами: более 30% пожаров на производстве связано с неисправностями в электрических сетях и оборудовании; около 15% несчастных случаев с тяжёлыми исходами обусловлены потерей энергоснабжения систем безопасности (вентиляция, блокировки, аварийное освещение); внезапное отключение напряжения приводит к травмам персонала при аварийной остановке механизмов (резкое торможение, выброс материала, падение груза) [1].

Таким образом, корректное описание базовой модели энергообеспечения (БМЭО) становится необходимым инструментом для решения прикладных задач промышленной безопасности, а именно выявления критических точек, где потеря или искажение параметров энергии угрожает жизни и здоровью работников; обоснования требований к резервированию и автономным источникам; разработки алгоритмов действий персонала при нештатных режимах электропитания.

В настоящей работе под базовой моделью энергообеспечения понимается схематизированное описание потоков энергии, узлов распределения и потребителей с позиций последствий их отказа, достаточное для оценки и управления рисками [2].

Предлагаемая БМЭО включает четыре функциональных уровня, каждый из которых описывается не электрическими параметрами (мощность, напряжение), а назначением и критичностью для непрерывности безопасного производства.

Уровень 1 – Внешнее энергоснабжение. Точка присоединения предприятия к сетям электросетевой организации. Значимые для промышленной безопасности характеристики: количество независимых вводов (один, два), наличие автоматического ввода резерва, вероятность полного отключения по внешним причинам (авария на питающей подстанции, обрыв линии, ремонтные работы). Последствие отказа: полное обесточивание предприятия с остановкой всех систем безопасности.

Уровень 2 – Внутреннее распределение (главный распределительный щит, трансформаторные подстанции, магистральные кабельные линии). На этом уровне энергия распределяется по корпусам и цехам. Для безопасности значимо разделение цепей «критического питания» (освещение путей эвакуации, вентиляция взрывоопасных зон, пожарные насосы) и технологических цепей. Последствие отказа: потеря энергоснабжения отдельных зон или сразу нескольких критических функций.

Уровень 3 – Цеховые и участковые сети. Распределение энергии внутри производственного помещения. Значимые параметры: наличие устройств защитного отключения (УЗО), исправность заземления, системы уравнивания потенциалов, степень износа изоляции. Последствие отказа: поражение электрическим током при косвенном прикосновении, невозможность локального отключения аварийного участка.

Уровень 4 – Непосредственные потребители (технологическое оборудование, системы вентиляции, насосы, освещение, системы контроля и автоматики). Именно на этом уровне потеря или искажение энергоснабжения напрямую трансформируется в механическую, термическую или химическую опасность. Для каждого потребителя в рамках модели необходимо знать является ли его аварийная остановка безопасной по умолчанию; имеет ли оборудование инерционный опасный элемент; оснащено ли оно автоматическим тормозом или защитным остановом при пропадании напряжения [3].

В рамках БМЭО выделяются три типовых режима нарушения энергообеспечения, каждый из которых порождает специфические риски для персонала и оборудования.

Режим 1: Полное и мгновенное отключение. Возникает при внешней аварии на питающей подстанции, коротком замыкании на главном вводе, разрушении кабеля экскаватором. Для промышленной безопасности наиболее опасны потеря общего и аварийного освещения; остановка приточной и вытяжной вентиляции; остановка насосов пожаротушения и системы дымоудаления; блокировка персонала в лифтах, подъёмниках.

Режим 2: Частичное отключение (обрыв одной фазы, повреждение одной линии, отключение отдельного щита). Характерен для внутренних неисправностей. Опасность этого режима часто недооценивается. Пример: при пропадании одной фазы у трёхфазного асинхронного двигателя (типичный привод станка, крана, конвейера) двигатель не отключается полностью, а переходит в аварийный режим работы с потерей крутящего момента, перегревом и неравномерным вращением. Это может привести к заклиниванию режущего инструмента с выбросом заготовки; падению груза, удерживаемого электромагнитом или талью; разрушению вращающихся частей.

Режим 3: Кратковременные пропадания и колебания напряжения. Возникают при пуске мощного оборудования у соседнего потребителя, при коммутациях в сети, при разрядах молнии. Для безопасности значимы ложные срабатывания или, наоборот, отказы систем блокировки и защиты; сброс программ программируемых логических контроллеров (ПЛК), отвечающих за безопасность, что разблокирует ограждения или отключит датчики положения [4].

Предлагаемая базовая модель требует, чтобы для каждого из трёх режимов была определена предельно допустимая длительность восстановления исходя из времени нарастания угрозы.

Таблица 1 – Предельные времена восстановления энергоснабжения

Режим	Критическая функция	Механизм угрозы	Предельное время восстановления
Полное отключение	Освещение путей эвакуации	Падения, столкновения	0 секунд (должно быть на аккумуляторах)
Полное отключение	Вытяжка взрывоопасной зоны	Достижение НКПР	30 секунд
Частичное отключение	Удержание груза краном	Срыв тормоза, падение	0 секунд (автоматический тормоз)
Колебания	ПЛК безопасности	Сброс программы, открытие дверей	Не допускаются, нужен ИБП

Исходя из базовой модели, требования к системе энергообеспечения формулируются не как инженерные, а как риск-минимизирующие.

Сетевой резерв. Второй независимый ввод от другой трансформаторной подстанции или даже от другой электрической системы. Надёжность

высокая, но экономически оправдан только для особо опасных производств (нефтехимия, предприятия с непрерывным циклом).

Автономный генератор (дизельный или газопоршневой) с автоматическим вводом резерва. Ключевой параметр для промышленной безопасности – время выхода на режим: для аварийного освещения – менее 5 секунд, для вентиляции взрывоопасных зон – менее 60 секунд.

Источник бесперебойного питания на аккумуляторах (ИБП). Обеспечивает защиту от колебаний и кратковременных пропаданий («миганий»). Основное ограничение: не способен питать мощные двигатели более нескольких минут. Применяется для систем автоматики, блокировок, освещения [5].

В результате проведенного исследования разработана и обоснована базовая модель энергообеспечения производства (БМЭО), ориентированная на решение задач промышленной безопасности. В отличие от существующих инженерных подходов, оперирующих мощностью, напряжением и сечениями кабелей, предложенная модель рассматривает систему энергообеспечения как риск-образующую структуру, где каждый уровень трансформации и распределения энергии потенциально способен генерировать опасности для персонала и оборудования.

Список использованных источников

1. Анализ причин несчастных случаев на энергоустановках, подконтрольных органам Ростехнадзора [Электронный ресурс]. – URL: http://szap.gosnadzor.ru/activity/energonadzor/nesc_sluch/ (дата обращения: 04.05.2026).
2. Пигилова, Р.Н. Базовая модель энергообеспечения производства / Р.Н. Пигилова, Р.А. Касымов, Ю.А. Аверьянова // EurasiaScience : Сборник статей LII международной научно-практической конференции, Москва, 31 марта 2023 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Актуальность.РФ», 2023. – С. 73-74. – EDN VJRCND.
3. Уровни системы электроснабжения [Электронный ресурс]. – URL: https://studopedia.ru/14_1354_urovni-sistemi-elektrosnabzheniya.html (дата обращения: 04.05.2026).
4. Электроустановка. Аварийный режим работы электроустановки [Электронный ресурс]. – URL: <https://propb.ru/library/wiki/elektroustanovka-avariynnyy-rezhim-raboty-elektroustanovki/> (дата обращения: 04.05.2026).
5. Ахметова, Д.Э. Организация и управление системой энергообеспечения предприятия / Д.Э. Ахметова, Р.Н. Пигилова // Тенденции развития науки и образования. – 2023. – № 97-12. – С. 195-197. – DOI 10.18411/trnio-05-2023-697. – EDN IQFEXN.

BASIC MODEL OF PRODUCTION POWER SUPPLY

A.A. Khazieva, R.N. Pigilova

*Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia*

A four-level power supply model is proposed, identifying areas of responsibility and criticality nodes. A «power supply failure – consequences for personnel and equip-

ment» matrix is constructed. Minimum permissible redundancy levels are determined for various functional groups of consumers.

Keywords: power supply, industrial safety, emergency mode, power supply reliability, industrial risk, electrical injuries, consumer categories.

УДК 550.832

ОСНОВНЫЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ЦЕМЕНТИРОВАНИЯ СКВАЖИН

Д.А. Хасанов

Уфимский университет науки и технологий,
г. Уфа, Россия,

В статье рассматриваются основные типы геофизических приборов, используемых для контроля качества тампонажа скважин, их физические принципы работы, конструктивные особенности, преимущества и ограничения области применения.

Ключевые слова: цементирование скважин, ультразвуковые и акустические методы каротажа.

Цементирование обсадных колонн – один из важных этапов строительства нефтяных и газовых скважин, в результате которого создается прочное и герметичное цементное кольцо между обсадной колонной и породой, что необходимо для решения следующих задач:

- изоляция продуктивных и водоносных пластов;
- предотвращение межпластовых перетоков;
- защита обсадной колонны от коррозии;
- повышение механической устойчивости скважины.

К сожалению, несмотря на соблюдение всех технологических требований к проводимым тампонажным работам, результат цементирования может оказаться неудовлетворительным, что может быть обусловлено следующими причинами:

- неполное заполнение затрубного пространства;
- образование каналов в цементном камне;
- горизонтальные разрывы цементного кольца, возникающие при механических нагрузках;
- низкая прочность и высокая проницаемость цементного камня, приводящие к потере герметичности;
- слабое сцепление цемента с колонной или породой;
- образование пустот и каверн.

Для выявления данных дефектов применяются геофизические методы контроля цементирования, позволяющие получить информацию о состоянии цементного кольца без вскрытия колонны [3]. К ним относятся акустические, ультразвуковые и радиоактивные методы исследования. Рас-

смотрим далее два основных вида цементометрии: акустическую (АКЦ) и ультразвуковую (УЗЦ).

Акустическая цементометрия [1] основана на измерении затухания упругих волн при их распространении вдоль обсадной колонны и её окружению. Основными узлами акустического цементомера являются осесимметричный излучатель (частота волны $\sim 12\text{--}30$ кГц) и приёмник, расположенные друг от друга на определенном расстоянии (как правило 0.2 – 0.5 м) называемом базой зонда. В ходе каротажа излученная источником акустическая волна, пройдя через скважинную жидкость достигает стенки обсадной колонны и, частично преломляется в нее двигаясь в сторону приемника. По мере распространения по колонне часть энергии волны передаётся в цементное кольцо и прилегающую горную породу. В результате по мере удаления приемников от излучателя, амплитуда регистрируемого ими сигнала уменьшается. Поскольку степень затухания сигнала в том числе, определяется содержимым затрубного пространства, это дает возможность оценить качество цементирования. Так, при отсутствии цементного камня волна не преломляется в породу и принимаемый сигнал характеризуется высокой амплитудой. В случае хорошего цементирования, наоборот, значительная часть энергии покидает колонну и интенсивность регистрируемой волны низкая.

Использование данного метода позволяет решать следующие задачи:

- определение высоты подъёма цемента в затрубном пространстве;
- обнаружение дефектов цементного камня, включая каналы, трещины и каверны;
- выявление наличия или отсутствия цемента за обсадной колонной;
- оценка степени сцепления цемента с обсадной колонной и стенками скважины.

Несмотря на все достоинства, традиционный акустический метод имеет ряд недостатков [3]. Одним из них является неоднозначность в определении типа дефекта цементного кольца. Например, в ходе интерпретации бывает трудно отличить случай полного отсутствия цемента в затрубном пространстве от ситуации, когда между цементным камнем и обсадной колонной имеет место микрозазор. Аналогичные трудности возникают при попытке различить каналы в цементе и участки кавернозного или разрушенного цементного камня. Кроме того, при анализе возникает значительное количество неопределенностей, связанных с геологическими условиями, конструкцией скважины и особенностями цементирования. В таких ситуациях для более точной оценки герметичности затрубного пространства приходится использовать дополнительные критерии, основанные на статистическом анализе полученных данных.

Для решения упомянутых выше проблем прибегают к использованию ультразвуковых методов геофизического исследования, интерес к которым в последние годы значительно возрос. Так, применение данной технологии

дает возможность дополнить результаты стандартной акустической цементометрии благодаря более детальному исследованию состояния цементного кольца [2].

Основная задача ультразвукового каротажа заключается в непосредственной идентификации типа дефектов цементного камня, таких как продольные каналы, кольцевые зазоры или другие нарушения структуры цемента, приводящие к нарушению герметичности затрубного пространства и возникновению гидравлической связи между пластами, содержащими флюиды различного состава и насыщения.

В ультразвуковых инструментах частота используемых акустических волн лежит в интервале от 100 до 1 МГц, что дает возможность фиксировать более тонкие изменения в контакте цемента, а также получать двух- и трёхмерные изображения цементного кольца [2].

Ультразвуковая цементометрия основана на анализе отраженных акустических волн и сочетает в себе два физических подхода – эхометод и реверберационный метод. Эхометод предполагает регистрацию сигналов, отраженных от различных границ и дефектов в контролируемой среде. Реверберационный метод основан на анализе процесса многократных отражений акустических волн внутри металлической трубы.

В результате многократного переотражения и постепенного затухания колебаний формируется характерная картина реверберации, параметры которой зависят от свойств окружающей среды и степени акустического контакта между колонной и цементным камнем.

Принцип работы реверберационного зонда заключается в возбуждении коротких акустических импульсов специальным преобразователем, расположенным внутри скважинного прибора. Этот преобразователь излучает ультразвуковой сигнал, который распространяется через буровой раствор, заполняющий внутреннее пространство обсадной колонны, и достигает её внутренней поверхности, и уже при взаимодействии с металлической стенкой колонны часть энергии ультразвуковой волны отражается обратно к преобразователю, а часть проходит через металл трубы и распространяется далее в окружающую среду, состоящую из цементного камня и горных пород. Отражённые сигналы регистрируются приёмной системой прибора и подвергаются дальнейшей обработке.

Основными параметрами, анализируемыми при ультразвуковом каротаже являются:

- 1) время распространения акустического импульса, которое зависит от толщины обсадной колонны и скорости распространения ультразвуковых колебаний в металле. На основании измерения времени прихода волны можно определить толщину стенки колонны и тем самым оценить возможное наличие участков коррозии, износа или механических повреждений.

- 2) амплитуда отражённой волны, в свою очередь, зависит от условий контакта между обсадной колонной и окружающей средой. Если за колон-

ной находится плотный цементный камень, часть энергии ультразвуковой волны передаётся в цемент, вследствие чего интенсивность отражённого сигнала уменьшается. При отсутствии цемента или наличии газовых каналов энергия волны отражается почти полностью, что приводит к увеличению амплитуды регистрируемого сигнала.

3) характер реверберации внутри колонны также содержит важную информацию: основная частота колебаний зависит от толщины стенки трубы, что дает возможность оценивать состояние обсадной колонны.

4) особенно важным является анализ затухания многократных отражений акустических волн: если за обсадной колонной отсутствует цемент или имеется значительное пространство, заполненное жидкостью или газом, акустические колебания внутри трубы затухают медленно, так как энергия волн практически не передается во внешнюю среду, а в случае же наличия плотного цементного кольца, хорошо сцепленного с колонной, происходит интенсивная передача энергии из металла трубы в цементный камень и далее в окружающие породы, приводя к быстрому затуханию акустических колебаний внутри колонны. Такой анализ скорости затухания сигнала позволяет оценить акустическое сопротивление среды за колонной и сделать выводы о состоянии цементного кольца.

Таким образом, применение ультразвуковой цементометрии существенно расширяет возможности контроля качества цементирования обсаженных скважин. Благодаря этому методу можно не только уточнить результаты традиционного акустического каротажа, но и выполнить более детальный анализ структуры цементного кольца, выявить различные типы дефектов и оценить герметичность затрубного пространства.

Список использованных источников

1. Васюнцов В.Д., Крылов Д.А. Применение акустического метода для определения параметров пород через обсадную колонну // Нефтяное хозяйство. – 1982. – № 4. – С. 73-75.
2. Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля. М.: Машиностроение, 1981. 8 с.
3. Конысов А. К. Проблемы акустической цементометрии // НТВ
4. «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2004. Вып. 7 (120). С. 144–154.

BASIC GEOPHYSICAL METHODS OF CEMENT BOND LOGGING

D.A. Khasanov

*Ufa University of Science and Technology,
Ufa, Russia*

The article discusses the main types plugging, their physical principles of operation, design features, as well as the advantages and limitations of their use.

Keywords: *well cementing, of geophysical instruments used to control the quality of well ultrasonic and acoustic logging methods.*

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Е.Ю. Царегородцева, В.Р. Масалимова, И.П. Насонов, В.М. Аксёнова

*Иркутский государственный университет путей сообщения,
г. Иркутск, Россия*

В статье рассматриваются вопросы обеспечения информационной безопасности интеллектуальных транспортных систем (ИТС). Проведён анализ актуальных киберугроз и уязвимостей, характерных для цифровой транспортной инфраструктуры, а также рассмотрены последствия реализации кибератак для безопасности дорожного движения и устойчивости транспортных процессов. Особое внимание уделено статистическим данным международных организаций, отражающим рост киберугроз в транспортной сфере. Выделены основные направления повышения защищённости ИТС.

Ключевые слова: информационная безопасность, интеллектуальные транспортные системы, киберугрозы, транспортная инфраструктура, беспилотный транспорт, цифровизация.

Интеллектуальные транспортные системы (ИТС) являются важнейшим элементом современной транспортной инфраструктуры, обеспечивающим повышение эффективности управления транспортными потоками, снижение аварийности и улучшение качества транспортного обслуживания. В условиях активной цифровизации транспортной отрасли возрастает зависимость её функционирования от информационных технологий, что делает вопросы информационной безопасности особенно актуальными.

ИТС включают в себя широкий спектр компонентов: системы управления дорожным движением, навигационные сервисы, системы мониторинга транспорта, а также технологии взаимодействия транспортных средств между собой и с инфраструктурой. Нарушение функционирования этих систем в результате кибератак может привести к серьёзным последствиям, включая транспортные сбои и угрозу жизни участников дорожного движения.

С развитием цифровых технологий увеличивается и количество киберугроз, направленных на транспортную инфраструктуру. Согласно отчётам международных организаций, наиболее распространёнными видами атак являются программы-вымогатели, фишинг, вредоносное программное обеспечение и атаки типа отказа в обслуживании. При этом доля атак с использованием программ-вымогателей выросла с 13% в 2021 году до 25% в 2022 году [1].

Дополнительно установлено, что более 55% инцидентов связаны с деятельностью киберпреступников, ориентированных на финансовую выгоду, а около 23% атак осуществляется хактивистами, преследующими политические или идеологические цели. Это подтверждает высокий уровень коммерциализации киберпреступности в транспортной сфере [2].

По данным Европейской комиссии, уже в 2019 году примерно каждая восьмая организация в Европе подвергалась кибератакам, что свидетельст-

вует о высокой актуальности вопросов информационной безопасности для критически важных отраслей, включая транспорт [3].

Современные транспортные системы становятся всё более цифровыми и взаимосвязанными, что приводит к расширению поверхности атак и увеличению числа потенциальных уязвимостей. Особенно уязвимыми являются системы управления дорожным движением, беспилотные транспортные средства и цифровые платформы управления перевозками.

Для систематизации основных киберугроз, характерных для интеллектуальных транспортных систем, а также возможных последствий их реализации и методов защиты, целесообразно представить обобщённые данные в виде таблицы.

Таблица 1 – Основные киберугрозы интеллектуальных транспортных систем и меры защиты [4]

Вид кибератаки	Описание	Возможные последствия	Методы защиты
Программы-вымогатели (Ransomware)	Блокировка систем с требованием выкупа	Остановка транспортных процессов, финансовые потери	Резервное копирование, антивирусная защита, обучение персонала
DDoS-атаки	Перегрузка серверов большим количеством запросов	Недоступность сервисов управления транспортом	Фильтрация трафика, распределённые системы защиты
Фишинг	Получение доступа через обман пользователей	Утечка данных, несанкционированный доступ	Обучение сотрудников, двухфакторная аутентификация
GPS-спуфинг	Подмена навигационных сигналов	Нарушение маршрутов, аварийные ситуации	Защищённые навигационные системы, проверка сигналов
Вредоносное ПО	Внедрение вредоносных программ	Нарушение работы систем, утечка информации	Антивирусы, обновление ПО, контроль доступа
Взлом беспилотных ТС	Получение контроля над транспортом	ДТП, угроза жизни людей	Шифрование, безопасные протоколы связи, тестирование безопасности

Представленные данные свидетельствуют о необходимости комплексного подхода к обеспечению информационной безопасности, включающего как технические, так и организационные меры защиты.

Особую опасность представляют атаки на системы управления дорожным движением, такие как светофорные комплексы и диспетчерские центры. В случае их компрометации возможно нарушение координации транспортных потоков, что может привести к аварийным ситуациям и транспортному коллапсу.

Беспилотные транспортные средства также являются уязвимыми к кибератакам, поскольку их функционирование напрямую зависит от программного обеспечения и сенсорных систем. Вмешательство в работу таких систем может привести к потере управления транспортным средством и возникновению дорожно-транспортных происшествий.

Обеспечение информационной безопасности интеллектуальных транспортных систем требует комплексного подхода, включающего [5, с. 79]:

- применение криптографических методов защиты информации;
- внедрение систем обнаружения и предотвращения вторжений;
- обеспечение безопасного обмена данными;
- регулярное обновление программного обеспечения;
- проведение аудита информационной безопасности;
- повышение квалификации персонала.

Важным направлением является также развитие нормативно-правовой базы, регулирующей вопросы информационной безопасности в транспортной сфере.

Проведённый анализ показывает, что развитие интеллектуальных транспортных систем сопровождается ростом киберугроз, способных оказывать существенное влияние на безопасность движения и устойчивость транспортной инфраструктуры.

Обеспечение информационной безопасности должно рассматриваться как приоритетное направление развития транспортной отрасли. Внедрение комплексных мер защиты и развитие технологий кибербезопасности позволит снизить риски реализации кибератак и обеспечить надёжное функционирование транспортных систем в условиях цифровизации.

Список использованных источников

1. ENISA Transport Threat Landscape/ Home/ Publications URL: https://www.enisa.europa.eu/publications/enisa-transport-threat-landscape?utm_source=chatgpt.com#contentList (дата обращения: 30.04.2026).
2. Understanding Cyber Threats in Transport/Home/ News URL: <https://www.enisa.europa.eu/news/understanding-cyber-threats-in-transport> (дата обращения: 29.04.2026).
3. Shaping Europe's digital future/ The 9th edition of the ENISA Threat Landscape Report URL: https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/9th-edition-enisa-threat-landscape-report?utm_source=chatgpt.com (дата обращения: 13.02.2026).
4. ENISA. Cyber Threat Landscape URL: <https://tools.enisa.europa.eu/topics/cyber-threats/?tab=details> (дата обращения: 13.04.2026).
5. Царегородцева, Е.Ю. Искусственный интеллект как инструмент защиты экономической информации / Е.Ю. Царегородцева, Я. . Жигунова // Постсоветский материк. – 2026. – № 1(49). – С. 79-88.

INFORMATION SECURITY OF INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS

E.Yu. Tsaregorodtseva, V.R. Masalimova, I.P. Nasonov, V.M. Aksenova

*Irkutsk State Transport University,
Irkutsk, Russia*

This article examines the information security of intelligent transportation systems (ITS). An analysis of current cyber threats and vulnerabilities specific to digital transportation infrastructure is provided, as well as the implications of cyber attacks for road

safety and the sustainability of transportation processes. Particular attention is paid to statistical data from international organizations reflecting the growth of cyber threats in the transportation sector. Key areas for enhancing ITS security are highlighted.

Keywords: information security, intelligent transportation systems, cyber threats, transportation infrastructure, driverless vehicles, digitalization.

УДК 004.85:004.738.5

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ИНТЕГРАЦИИ FASTAPI, MYSQL И SCIKIT-LEARN В ЗАДАЧАХ АНАЛИЗА ПОВЕДЕНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ

Н.В. Чувило

*Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина,
г. Краснодар, Россия*

В статье представлены результаты исследования и разработки гибридной клиент-серверной системы для анализа поведения пользователей сети Интернет с использованием методов машинного обучения. Система объединяет асинхронный веб-фреймворк FastAPI, реляционную СУБД MySQL и библиотеку scikit-learn. Описан синергетический эффект, возникающий при интеграции разнородных компонентов: автоматический конвейер «сбор событий – агрегация – кластеризация (k-means) – классификация (логистическая регрессия) – визуализация». Выполнено сравнение с ручным анализом и облачным сервисом (Usedesk). Показано, что временные затраты на один цикл анализа сокращаются с 4 часов до 2 минут, точность выделения целевой группы возрастает с 40 % до 85 %, а стоимость владения в горизонте 3 лет оказывается в 2,4 раза ниже по сравнению с подпиской на готовое SaaS-решение. Себестоимость разработки составила 136 600 руб., период окупаемости – 1,5 года. Сделан вывод о целесообразности создания открытых, настраиваемых ML-систем для малого и среднего бизнеса.

Ключевые слова: машинное обучение, k-means, логистическая регрессия, FastAPI, MySQL, scikit-learn, анализ поведения пользователей, синергетический эффект, отток клиентов (churn), малый бизнес, импортозамещение в ИТ.

Введение. Современный этап развития информационных технологий характеризуется лавинообразным ростом поведенческих данных пользователей. Согласно исследованиям, к 2025 году ежедневный объем таких данных достигнет 180–200 петабайт. Малые и средние предприятия (МСП) сталкиваются с дилеммой: либо приобретать дорогостоящие облачные сервисы аналитики (Usedesk, FreshDesk, Zendesk) с годовой подпиской от 90 до 300 тыс. руб., либо разрабатывать собственные решения. Однако типичные самодельные системы часто ограничиваются простыми SQL-запросами и не содержат модулей машинного обучения (ML). Цель настоящей работы – исследование методов машинного обучения (k-means и логистической регрессии) и разработка гибридной системы, сочетающей

веб-сбор событий, реляционное хранение данных и ML-анализ на открытом стеке технологий, а также количественная оценка синергетического и экономического эффектов.

Материалы и методы. Система спроектирована на основе методологии функционального моделирования IDEF0. Контекстная диаграмма включает входы (действия пользователя, настройки аналитика), выходы (сегмент кластера, вероятность оттока, рекомендации), управление (требования к анализу) и механизмы: FastAPI, MySQL, scikit-learn. Декомпозиция содержит пять блоков: A1 – сбор действий на сайте (HTML/JS); A2 – приём событий на FastAPI; A3 – хранение и агрегация признаков в MySQL; A4 – ML-анализ (k-means + логистическая регрессия); A5 – визуализация в админ-панели.

Статистическая модель включает пять поведенческих признаков:

число сессий (разрыв между событиями > 30 мин);

средняя длительность сессии (сек);

число уникальных страниц;

доля визитов в выходные;

количество целевых действий (например, добавлений в корзину).

Признаки нормализуются MinMaxScaler. Для кластеризации используется алгоритм k-means с K=3 (выбрано по методу «локтя»). Для бинарной классификации (отток / лояльный) – логистическая регрессия с градиентным спуском. Оценка качества модели выполнена на тестовой выборке (20 % данных) с расчётом Accuracy, Precision, Recall.

Программная реализация включает: тестовый сайт на HTML/JS; микросервис на FastAPI (эндпоинты /event, /run_analysis, /users, /result/{user_id}); базу данных MySQL (таблицы Users, Events, EventTypes, ClusteringResults, ClassificationResults, ModelWeights); функции run_kmeans и run_logistic на Python с scikit-learn; админ-панель с Chart.js. Все компоненты работают асинхронно (библиотека asyncmy).

Результаты и обсуждение. Синергетический эффект. Каждый компонент по отдельности не решает задачу: FastAPI не хранит данные, MySQL не содержит ML-алгоритмов, scikit-learn не принимает HTTP-запросы. При интеграции возникает новое качество – непрерывный конвейер, в котором события автоматически сохраняются, агрегируются, передаются в ML-модели, а результаты возвращаются в веб-интерфейс без ручного экспорта/импорта. Это позволяет маркетологу получать готовые сегменты и прогнозы оттока за 2 минуты вместо 4 часов при ручном анализе.

Экономическая оценка. Себестоимость разработки (один разработчик, 160 часов по ставке 500 руб./час, отчисления 30 %, амортизация, накладные расходы) составила 136 600 руб. Период окупаемости по сравнению с подпиской на Usedesk: $136\,600 / 90\,000 \approx 1,52$ года. За три года экономия достигает $3 \times 90\,000 - 136\,600 = 133\,400$ руб.

Практическая реализация. В тестовом сценарии (20 пользователей, 500 событий) система продемонстрировала следующие метрики классификации: Accuracy = 0,82, Precision = 0,81, Recall = 0,84. Пример трёх кластеров:

Кластер 1 («новички»): мало сессий, низкая длительность – рекомендация: приветственный купон.

Кластер 2 («активные»): средние показатели – программа лояльности.

Кластер 3 («суперактивные»): высокая активность – доступ к закрытым распродажам.

Разработана и апробирована гибридная система анализа поведения пользователей, построенная на связке FastAPI + MySQL + scikit-learn. Доказано, что интеграция разнородных открытых компонентов порождает синергетический эффект: автоматический замкнутый цикл сбора, агрегации, ML-анализа и визуализации. По сравнению с ручным анализом временные затраты сокращены в 120 раз, точность повышена более чем в два раза. По сравнению с облачным сервисом (Usedesk) система обеспечивает полный контроль над данными, возможность кастомизации любых ML-алгоритмов, работу в офлайн-режиме и отсутствие регулярных платежей. Себестоимость разработки окупается за 1,5 года, после чего каждый последующий год эксплуатации даёт чистую экономию около 90 тыс. руб. Предложенное решение может быть рекомендовано малому и среднему бизнесу, а также государственным учреждениям с требованиями к информационной безопасности и автономности.

Список использованных источников

1. Барановская, Т.П. Информационные системы и технологии в экономике: учебник / Т.П. Барановская, В.И. Лойко, М.И. Семенов, А.И. Трубилин; под ред. В.И. Лойко. – М.: Финансы и статистика, 2007. – 416 с.
2. Барсегян, А.А. Анализ данных и процессов : учебное пособие / А.А. Барсегян, М.С. Куприянов, И.И. Холод, М.Д. Тесс, С.И. Елизаров. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2009. – 512 с.
3. Белов, В.В. Компьютерная поддержка системного анализа / В.В. Белов, Е.Н. Гордиенко, В.Г. Острейковский. – М.: Высшая школа, 2002. – 350 с.
4. Бишоп, К.М. Распознавание образов и машинное обучение / К.М. Бишоп; пер. с англ. – М.: ДМК Пресс, 2019. – 960 с.
5. Вендров, А.М. Проектирование программного обеспечения: учебное пособие / А.М. Вендров. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 400 с.
6. Гагарина, Л.Г. Разработка и эксплуатация автоматизированных информационных систем / Л.Г. Гагарина. – М.: Форум: Инфра-М, 2021. – 400 с.
7. Рамальо, Л. Python. К вершинам мастерства / Л. Рамальо. – М.: ДМК Пресс, 2020. – 848 с.
8. Гудфеллоу, Я. Глубокое обучение / Я. Гудфеллоу, И. Бенджио, А. Курвилль; пер. с англ. – М.: ДМК Пресс, 2018. – 652 с.

SYNERGISTIC EFFECT OF INTEGRATION OF FASTAPI, MYSQL, AND SCIKIT-LEARN IN USER BEHAVIOR ANALYSIS

N.V. Chuvilo

*Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin,
Krasnodar, Russia*

The article presents the results of research and development of a hybrid client-server system for analyzing user behavior on the Internet using machine learning methods.

The system combines the asynchronous web framework FastAPI, the relational DBMS MySQL and the scikit-learn library. The synergistic effect arising from the integration of heterogeneous components is described: an automatic pipeline «event collection – aggregation – clustering (k-means) – classification (logistic regression) – visualization». A comparison with manual analysis and a cloud service (Usedesk) is performed. It is shown that the time spent on one analysis cycle is reduced from 4 hours to 2 minutes, the accuracy of target group identification increases from 40 % to 85 %, and the total cost of ownership over a 3-year horizon is 2.4 times lower compared to a subscription to a ready-made SaaS solution. The development cost was 136 600 rubles, the payback period is 1.5 years. The conclusion is made about the feasibility of creating open, customizable ML systems for small and medium-sized businesses.

Keywords: machine learning, k-means, logistic regression, FastAPI, MySQL, scikit-learn, user behavior analysis, synergistic effect, customer churn, small business, IT import substitution.

УДК 613.644

ШУМ КАК ВРЕДНЫЙ ФАКТОР ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СРЕДЫ: ИСТОЧНИКИ И МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ РИСКОВ

В.Р. Шарипова, Р.Н. Пигилова

*Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия*

В статье рассмотрены вопросы производственного шума как вредного фактора среды. Приведены классификация шума, основные источники его возникновения и гигиенические нормативы. Проанализированы методы коллективной и индивидуальной защиты, требования к измерениям на рабочих местах. Представлен комплексный подход к снижению профессиональных рисков.

Ключевые слова: производственный шум, вредный фактор, источники шума, предельно допустимый уровень, средства защиты, звукоизоляция, специальная оценка условий труда.

Шум является одним из наиболее распространенных вредных факторов производственной среды, воздействию которого подвергаются миллионы работников. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения, профессиональная тугоухость занимает лидирующие позиции в структуре профессиональных заболеваний. Актуальность темы обусловлена не только медицинскими, но и социально-экономическими последствиями шумового воздействия: снижением работоспособности, ростом числа ошибок и производственного травматизма.

С физической точки зрения шум представляет собой совокупность аperiodических звуков различной интенсивности и частоты. Основными характеристиками шума являются уровень звукового давления (дБ), частота (Гц) и интенсивность [1].

По характеру спектра различают широкополосный шум с непрерывным спектром и тональный шум, в спектре которого имеются выраженные

дискретные составляющие. По временным характеристикам выделяют постоянный и непостоянный шум, который подразделяется на колеблющийся, прерывистый и импульсный.

Современные исследования позволяют выделить три категории источников шума в зависимости от частотных характеристик: низкочастотный (шлифовальные машины, станки), среднечастотный (штамповочные прессы, сварочное оборудование) и высокочастотный шум (токарные станки, сборочное оборудование) [2].

По механизму образования различают шум механического, аэродинамического, гидродинамического и электромагнитного происхождения. На установках сероочистки природного газа источниками шума выступают градирни, насосные агрегаты, установки разделения воздуха и скоростные трубопроводы с уровнями до 96 дБ(А). В угольной промышленности наиболее шумное оборудование – вибрационные грохоты и конвейеры, где превышение допустимых уровней достигает 15-20 дБ. На авиапредприятиях при опробовании двигателей уровни шума достигают 100-110 дБА, что создает угрозу маскировки предупредительных сигналов [3].

Воздействие шума не ограничивается только органом слуха. Шум является общебиологическим раздражителем, влияющим на все системы организма. Слуховой анализатор реагирует развитием тугоухости различной степени. Неспецифические реакции проявляются нарушениями со стороны центральной нервной системы (раздражительность, снижение работоспособности), сердечно-сосудистой системы (артериальная гипертензия), эндокринной системы [4].

При сочетанном воздействии шума и вибрации наблюдается синергетический эффект – более выраженные нарушения регуляции сердечного ритма, чем при изолированном действии каждого фактора. Существенное влияние оказывают и поведенческие факторы: среди работников с нарушениями слуха выше доля курящих, лиц с недостаточной физической активностью и избыточной массой тела [5].

Гигиеническое нормирование базируется на концепции предельно допустимых уровней (ПДУ). Критерием для оценки постоянного шума служат уровни звукового давления в октавных полосах частот, для непостоянного шума – эквивалентный уровень звука. Предельно допустимый эквивалентный уровень звука на рабочих местах составляет 80 дБА.

Перспективным направлением является спектральный анализ шума с последующей кластеризацией источников и разработкой адресных мер защиты, поскольку для низкочастотного и высокочастотного шума эффективны разные методы снижения.

Снижение шума может достигаться тремя основными путями: уменьшением шума в источнике, снижением на путях распространения и применением средств индивидуальной защиты.

Снижение шума в источнике – наиболее радикальный метод, достигаемый заменой ударных процессов безударными, балансировкой вра-

щающихся частей, использованием малошумных материалов. На обогатительной фабрике замена стандартных сит на полиуретановые и внедрение резиновых пневмобаллонов вместо металлических пружин позволили снизить шум на 8-12 дБ.

Снижение шума на путях распространения включает звукоизоляцию (кожухи, кабины, экраны эффективностью до 20-30 дБ), звукопоглощение (облицовка стен пористыми материалами снижает шум на 6-8 дБ), виброизоляцию и глушители. Перспективно применение многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов [6].

Архитектурно-планировочные мероприятия предполагают удаление рабочих мест от шумного оборудования, вынос агрегатов в изолированные помещения, создание шумозащищенных зон. Организационные мероприятия включают ограничение времени пребывания в шумных условиях, дистанционное управление, регулярный контроль уровней шума и медицинские осмотры.

Средства индивидуальной защиты (противошумные наушники, вкладыши, шлемы) применяются, когда коллективные средства не обеспечивают требуемого снижения. Эффективность СИЗ зависит от правильности подбора и регулярности использования. На авиапредприятиях требуется специальный подход к выбору средств защиты, обеспечивающих сохранение слышимости предупредительных сигналов.

Перспективным направлением является применение активных методов шумоподавления, основанных на интерференции звуковых волн. Системы активного шумоподавления генерируют звук в противофазе к исходному шуму, что позволяет существенно снизить его уровень в локальной зоне.

Разрабатываются интеллектуальные системы мониторинга на основе глубокого обучения, позволяющие идентифицировать источники, прогнозировать развитие ситуаций и выдавать предупреждения. Изучается возможность фармакологической защиты органа слуха (отопротекции), в частности защитное действие аргонокислородных газовых смесей.

Проблема производственного шума сохраняет высокую актуальность. Эффективное решение требует комплексного подхода, включающего технические (снижение шума в источнике и на путях распространения), организационные (режимы труда и отдыха) и медико-профилактические (медосмотры, СИЗ) мероприятия.

Важнейшими направлениями дальнейших исследований являются: разработка методов оценки сочетанного действия шума с другими вредными факторами, создание новых звукопоглощающих материалов, внедрение интеллектуальных систем мониторинга, совершенствование СИЗ с сохранением восприятия полезных сигналов. Только реализация всего комплекса защитных мер позволит минимизировать профессиональные риски и сохранить здоровье работников.

Список использованных источников

1. Степанова И.А. Физические факторы окружающей среды. Определение уровня шума: методические указания [Электронный ресурс]. – URL:

<https://elib.osu.ru/bitstream/123456789/12651/1/Степанова.pdf>(дата обращения: 18.03.2026).

2. Гайнуллина, Л.Р. Шум в энергетическом секторе: анализ и методы защиты / Л.Р. Гайнуллина, Р.Н. Пигилова, Ф.М. Филиппова // Безопасность жизнедеятельности. – 2025. – № 11(299). – С. 21-28. – EDN KVMIE.

3. Гигиеническая оценка шума и вибрации на производстве [Электронный ресурс] // Mining Media. – URL: <https://mining-media.ru/ru/article/newtech/15554-gigienicheskaya-otsenka-shuma-i-vibratsii-voz> (дата обращения: 18.03.2026).

4. Экологически устойчивое развитие и рациональное использование природных ресурсов [Электронный ресурс] // Eco-OOS. – URL: <https://eco-oos.ru/biblio/sborniki-nauchnyh-trudov/ekologicheskii-ustoichivoe-razvitiie-racionalnoe-ispolzovanie-prirodnih-resursov/69/> (дата обращения: 18.03.2026).

5. Синергетический эффект [Электронный ресурс] // Финансовый словарь. – URL: https://1fin.ru/Finansovyy_slovary/Sinergeticheskiy_effekt (дата обращения: 18.03.2026).

6. Борьба с шумом и вибрацией [Электронный ресурс] // Учебник по промышленной экологии. – URL: <http://ekologyprom.ru/uchebnik-po-promyshlennoj-ekologii/143-borba-s-shumom-i-vibraciej.html> (дата обращения: 18.03.2026)

NOISE AS A HARMFUL FACTOR OF THE INDUSTRIAL ENVIRONMENT: SOURCES AND METHODS OF RISK REDUCTION

V.R. Sharipova, R.N. Pigilova

*Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia*

The article discusses the issues of industrial noise as a harmful environmental factor. It provides a classification of noise, the main sources of its occurrence, and hygienic standards. The article analyzes the methods of collective and individual protection, as well as the requirements for measurements in the workplace. It also presents a comprehensive approach to reducing occupational risks.

Keywords: industrial noise, harmful factor, sources of noise, maximum permissible level, means of protection, sound insulation, special assessment of working conditions.

УДК 004.7

МОДУЛЬНАЯ СИСТЕМА УДАЛЁННОГО МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ НА ПРОЦЕССОРЕ ESP32 С ВЕБ-ИНТЕРФЕЙСОМ И ЛОКАЛЬНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

И.В. Шибитов

*Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
г. Москва, Россия*

Работа посвящена разработке и исследованию модульной системы удалённого мониторинга и управления на базе микроконтроллера ESP32. Рассматриваются архитектура, ключевые компоненты (веб-сервер, дисплей с I2C, инкременталь-

ный энкодер) и решение проблемы согласования логических уровней. Приводятся результаты практической реализации и интеграции модулей.

Ключевые слова: ESP32, веб-сервер, I2C-протокол, ЖК-дисплей LCD1602, энкодер KY-040, преобразователь логических уровней, удалённое управление, IoT, человеко-машинный интерфейс, Arduino IDE, HTTP-запросы, модульная архитектура.

В современных промышленных и исследовательских задачах всё более востребованными становятся системы, позволяющие осуществлять удалённый контроль и управление оборудованием в местах, где нахождение человека опасно, затруднено или нежелательно. К таким зонам относятся производства с вредными условиями труда, объекты с повышенным уровнем радиации, труднодоступные технологические отсеки, а также удалённые промышленные установки.

Существующие на рынке решения можно разделить на две категории: простые автономные устройства с ограниченным функционалом и дорогостоящие промышленные контроллеры, избыточные для многих прикладных задач. Возникает потребность в универсальной, недорогой и энергоэффективной системе, сочетающей удалённый доступ через веб-интерфейс с локальным управлением.

Ключевая особенность данной системы – модульная архитектура, позволяющая адаптировать устройство под разные задачи. В основе лежат три компонента: веб-сервер, символьный дисплей и поворотный энкодер. [1] Предусмотрено согласование логических уровней 3.3 В и 5 В для стабильной работы. Программное обеспечение оптимизировано для параллельной обработки сетевых запросов, периферии и пользовательского ввода. Устройство способно автономно собирать данные с сенсоров, передавать их на удалённый пульт через веб-интерфейс и принимать команды на изменение параметров работы оборудования без необходимости физического присутствия оператора в опасной зоне.

Решение занимает нишу между простыми автономными устройствами и сложными промышленными контроллерами, обеспечивая баланс функциональности, цены и энергоэффективности. Универсальность архитектуры позволяет применять систему в областях от бытовой автоматизации до промышленного мониторинга, включая экологический надзор, контроль на вредных производствах и дистанционное управление в условиях, небезопасных для человека.

Система построена на базе модулей, выбранных по критериям надёжности, энергоэффективности и цены.

- ESP32-WROOM-32 – центральный вычислительный узел. Двухъядерный процессор 240 МГц, Wi-Fi, Bluetooth 4.2, 520 КБ SRAM, 4 МБ Flash, до 36 GPIO (PWM, I2C, SPI, UART), питание 3.3 В. Цена: ~500–1000 руб.

- ЖК-дисплей LCD1602 с I2C (16×2 символов, монохромный). I2C-адаптер на PCF8574 сокращает число соединений. Питание 5 В, регулируемая подсветка. Цена: ~300–500 руб. в комплекте.

– Инкрементальный энкодер KY-040 – устройство физического ввода (2 фазы + кнопка). Разрешение: 20 импульсов/оборот. Работает от 5 В (совместим с 3.3 В). Ресурс: 50 000–100 000 циклов. Цена: ~150–300 руб.

– Преобразователь логических уровней (4 канала, TXB0104). Автоматическое двунаправленное согласование уровней 1.8 ↔ 3.3 ↔ 5 В, скорость до 100 Мбит/с. Цена: ~200–400 руб.

Для начала работы с платформой ESP32 DevKit на языке C++ скачаем и установим на компьютер интегрированную среду разработки Arduino IDE, находящуюся в свободном доступе. По умолчанию среда IDE настроена только на AVR-платы. Поэтому для платформы ESP32 DevKit добавим в менеджере плат поддержку платформ на модуле ESP32.

Управление устройствами через веб-сервер ESP32 происходит через HTTP-запросы. При вводе URL в браузере отправляется GET-запрос на сервер. ESP32 обрабатывает его: например, включает светодиод и возвращает веб-страницу с его состоянием (в проекте светодиоды позже заменят дисплеем).

Скетч использует библиотеки WiFi.h (подключение к сети) и WebServer.h (настройка сервера и обработка запросов). ESP32 в режиме станции (STA) подключается к существующей сети с указанием SSID, пароля, IP-адреса, маски и шлюза.

Создается объект WebServer на порту 80 (HTTP по умолчанию). Настраиваются выходы GPIO для светодиодов. Метод `on` связывает URL с функциями обработки (например, `handle_OnConnect` для корневого пути). Для несуществующих URL используется `server.onNotFound()` с ответом 404.

Запуск сервера – `server.begin()`, обработка запросов – `server.handleClient()`. Функции, назначенные URL, устанавливают состояние светодиодов и отправляют HTML-страницу методом `send()` с кодом 200. Функция `SendHTML()` динамически генерирует страницу: заголовок, CSS-стили кнопок (разные цвета для ВКЛ/ВЫКЛ), отображение статуса через `if`.

После загрузки скетча в Serial Monitor виден IP-адрес ESP32. Перейдя по нему в браузере, получаем страницу с кнопками. При нажатии кнопки отправляется запрос типа `/led1on`, ESP32 включает светодиод и обновляет статус. Так получается рабочий веб-сервер на ESP32.

I2C (Inter Integrated Circuits) – синхронный протокол связи, использующий два провода: SDA (данные) и SCL (синхронизация). Контроллер на базе микросхемы PCF8574 преобразует эти два сигнала в 8 обычных портов ввода/вывода. I2C-модуль также имеет встроенный потенциометр для регулировки яркости ЖК-дисплея.

Подключение к ESP32:

- Контакты 1-16 модуля I2C – к ЖК-дисплею
- SDA модуля – SDA (D21) ESP32
- SCL модуля – SCL (D22) ESP32

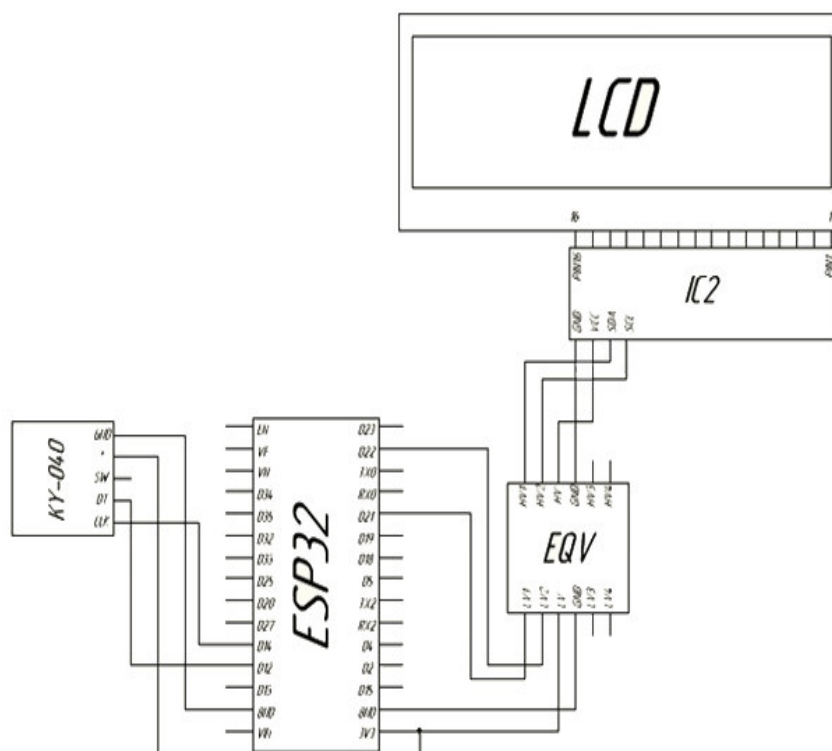


Рисунок 1 – Итоговая схема системы беспроводного управления

Для согласования напряжений (дисплей требует 5 В, ESP32 даёт 3.3 В) используется логический преобразователь уровней: VCC, SDA и SCL подключаются через HV/LV каналы.

Определение адреса I2C. Адрес модуля по умолчанию – 0x27 или 0x3F. Для его определения собирают схему, загружают в ESP32 специальный скетч и смотрят адрес в мониторе последовательного порта. Этот адрес используется в основной программе.

Потребуется библиотека LiquidCrystal_I2C (обычная LiquidCrystal не подходит), а также встроенная Wire. В коде задаётся адрес (например, 0x27) и режим дисплея (16×2). В setup() инициализируются дисплей и последовательная связь, включается подсветка.

Вместо светодиодов теперь используется дисплей: меняются названия переменных, добавляется кратковременный вывод сообщения о запуске сервера. Условия для кнопок переписываются под все четыре комбинации состояний, обновляется только первая строка дисплея. Названия методов также изменяются под новые переменные.

Энкодер KY-040 – инкрементальный поворотный датчик. При вращении вала он генерирует два квадратурных сигнала (фазы А и В) со сдвигом 90°, что позволяет определять направление вращения. Также имеется тактовая кнопка при нажатии на вал. У энкодера 5 выводов: CLK (фаза А), DT (фаза В), SW (кнопка, замыкается на GND), VCC (+3.3 В или +5 В) и GND.

Используется библиотека Encoder.h, упрощающая обработку квадратурных сигналов. Энкодер инициализируется с указанием пинов CLK (14)

и DT (12). Последовательный порт настраивается на скорость 115200 для отладки. Пин кнопки энкодера (13) настраивается как вход с подтяжкой к +3.3 В для стабильного высокого уровня при не нажатой кнопке. [2]

Создаётся глобальная переменная для хранения предыдущей позиции энкодера (работа с большими значениями счётчика). В основном цикле считается текущая позиция, и если она изменилась – новое значение фиксируется и отображается.

После интеграции в основной проект информация о направлении вращения и позиции энкодера выводится на дисплей (рисунок 1).

Разработанная система представляет собой законченное решение для удалённого управления и мониторинга на базе микроконтроллера ESP32. В ходе работы успешно реализована интеграция трёх ключевых компонентов: веб-сервера для удалённого доступа, локального интерфейса на основе ЖК-дисплея и тактильного управления через энкодер. Полученная система демонстрирует стабильную работу всех модулей как по отдельности, так и в комплексном взаимодействии. Особое внимание было уделено решению проблемы согласования логических уровней между компонентами системы. Использование двунаправленного преобразователя уровней позволило обеспечить надёжную передачу сигналов между устройствами с разным рабочим напряжением. В результате удалось достичь стабильной параллельной работы веб-сервера, дисплея и энкодера без взаимных помех и сбоев. Устройство демонстрирует быстрый отклик на команды (менее 500 мс) и точное определение позиции энкодера.

Список использованных источников

1. Хоровиц, П. Искусство схемотехники: В 3 т. Т. 1 / П. Хоровиц, У. Хилл; пер. с англ. – 7-е изд. – М.: Мир, 2019. – 704 с.
2. Монк, С. Програмируем Arduino. Профессиональная работа со скетчами / С. Монк; пер. с англ. – СПб.: Питер, 2016. – 320 с.

MODULAR SYSTEM OF REMOTE MONITORING AND CONTROL ON ESP32 PROCESSOR WITH WEB INTERFACE AND LOCAL CONTROL

I.V. Shibitov

*National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
Moscow, Russia*

This work is devoted to the development and study of a modular remote monitoring and control system based on the ESP32 microcontroller. The architecture, key components (a web server, an I2C display, and an incremental encoder), and the solution to the logic level matching problem are discussed. The results of the practical implementation and integration of the modules are presented.

Keywords: ESP32, web server, I2C protocol, LCD1602 liquid crystal display, KY-040 encoder, logic level converter, remote control, IoT, human-machine interface, Arduino IDE, HTTP requests, modular architecture.

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В СИСТЕМАХ ВОССТАНОВЛЕНИЯ МОСТОВ И ПУТЕПРОВОДОВ

П.Д. Широкова

*Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия*

Проанализированы основные причины разрушения мостов и путепроводов. Рассматриваются преимущества полимерных композиционных материалов для их ремонта и восстановления.

Ключевые слова: мосты, путепроводы, транспортные сооружения, полимерные композиционные материалы.

Развитие современной транспортной инфраструктуры невозможно без надёжного функционирования мостов, путепроводов, эстакад и других инженерных сооружений, но, как известно, их длительная эксплуатация транспортных сооружений сопровождается постепенным износом конструкций, воздействием агрессивной окружающей среды и накоплением повреждений.

Разрушение и деградация транспортных конструкций обусловлены совокупностью эксплуатационных и природно-климатических факторов, где наиболее распространёнными причинами повреждений являются:

- коррозия арматуры и металлических элементов;
- циклические нагрузки от транспортных потоков;
- воздействие влаги и химически агрессивных веществ;
- температурные деформации;
- карбонизация бетона;
- усталостные явления;
- ошибки проектирования и нарушения технологии строительства;
- увеличение фактических нагрузок по сравнению с расчётными.

Особенно интенсивно процессы разрушения проявляются в мостовых сооружениях, подвергающихся постоянному воздействию атмосферных осадков, противогололёдных реагентов и вибрационных нагрузок.

Наиболее распространёнными проблемами мостовых сооружений являются разрушение защитного слоя бетона, коррозия металлической арматуры, образование трещин, деформации элементов и нарушение гидроизоляции. И под воздействием внешних факторов происходит постепенное ухудшение физико-механических свойств строительных материалов, что приводит к снижению долговечности конструкций и необходимости проведения ремонтно-восстановительных работ.

Особенно интенсивное разрушение транспортных сооружений наблюдается в условиях воздействия влаги, перепадов температур и химически активных веществ. В зимний период для борьбы с гололёдом широко применяются песчаносолевые смеси и противогололёдные реагенты, со-

держат хлориды, но несмотря на эффективность таких средств для обеспечения безопасности дорожного движения, они оказывают крайне негативное влияние на состояние мостовых конструкций. Проникая в поры и микротрещины бетона, хлориды постепенно достигают поверхности арматуры и нарушают её пассивное состояние, и в результате начинается процесс коррозии стали, сопровождающийся увеличением объёма продуктов окисления. Это и вызывает внутренние напряжения в бетоне, образование трещин и отслоение защитного слоя. Со временем разрушение приобретает прогрессирующий характер, что существенно снижает надёжность сооружения.

Особую опасность коррозионные процессы представляют для предварительно напряжённых железобетонных конструкций, широко применяемых в мостостроении. Используемая в таких элементах высокопрочная проволочная арматура обладает высокой чувствительностью к коррозии. Даже локальные повреждения отдельных проволок способны привести к снижению общей прочности конструкции и возникновению аварийных ситуаций.

Итак, проблема долговечности транспортных сооружений во многом связана с недостаточной эффективностью традиционных гидроизоляционных и антикоррозионных материалов. В течение многих десятилетий в строительной практике широко применялись покрытия на основе битумов, дегтей, жидкого стекла и различных мастик. Однако данные материалы имеют ряд существенных недостатков, ограничивающих их применение в современных условиях эксплуатации.

Одной из главных проблем битумных материалов является сравнительно небольшой срок службы, который обычно не превышает 10–15 лет. Для мостов и путепроводов, срок эксплуатации которых исчисляется десятилетиями, подобная долговечность оказывается недостаточной. Кроме того, битумные покрытия чувствительны к температурным воздействиям: при низких температурах они становятся хрупкими и склонными к растрескиванию, а при высоких – размягчаются и теряют устойчивость к деформациям. Дополнительные трудности возникают при выполнении ремонтных работ, поскольку многие традиционные материалы требуют сухой поверхности и определённых температурных условий. Это ограничивает возможность проведения ремонта в неблагоприятных климатических условиях и усложняет восстановление действующих сооружений.

В связи с этим перспективным направлением стало применение полимерных композиционных материалов, обладающих высокой прочностью, устойчивостью к коррозии и способностью работать в сложных эксплуатационных условиях.

Полимерные композиционные материалы представляют собой многокомпонентные системы, состоящие из полимерной матрицы и армирующих наполнителей, где в качестве армирующих элементов чаще всего используются углеродные, стеклянные, базальтовые и арамидные волокна. И благодаря сочетанию высокой прочности и малого удельного веса компо-

зиты позволяют эффективно усиливать строительные конструкции без значительного увеличения нагрузки на сооружение.

Широкое распространение в транспортном строительстве получили эпоксидные композиции и материалы на их основе. Эпоксидные смолы обладают высокой химической стойкостью, хорошей адгезией к бетону и металлу, а также способностью образовывать прочные защитные покрытия. Они активно используются при устройстве гидроизоляции, антикоррозионной защите и инъекционном ремонте трещин. Однако эпоксидные материалы имеют и определённые недостатки. Одной из основных проблем является высокая стоимость таких композиций, особенно при выполнении масштабных ремонтных работ. Кроме того, многие эпоксидные составы характеризуются повышенной вязкостью и недостаточной эластичностью, что ограничивает их способность воспринимать деформации конструкции без образования трещин.

Серьёзным недостатком эпоксидных систем считается также их низкая адгезия к влажному основанию. Для мостов, тоннелей и подземных сооружений наличие влаги является практически неизбежным фактором, поэтому невозможность эффективной работы во влажной среде существенно ограничивает применение ряда эпоксидных материалов.

Несмотря на существующие ограничения, дальнейшее развитие технологий полимерных композиционных материалов позволило значительно улучшить их свойства. Современные композитные системы уже обладают высокой прочностью, устойчивостью к растрескиванию и способностью отверждаться как в сухой, так и во влажной среде. Это делает их особенно эффективными при ремонте действующих мостов и путепроводов, где полное устранение влаги зачастую невозможно.

Одним из наиболее распространённых способов восстановления конструкций является внешнее армирование железобетонных элементов композитными материалами. Суть метода заключается в приклеивании углеродных лент, ламелей или тканей к поверхности конструкции с использованием специальных полимерных клеевых составов. После отверждения клея композит начинает совместно работать с железобетонным элементом, воспринимая часть растягивающих усилий и снижая напряжения в повреждённых участках. Использование композитного усиления также позволяет эффективно повышать несущую способность балок, плит пролётных строений, колонн и опор мостов. В отличие от традиционных металлических элементов усиления, композиты практически не подвержены коррозии и обладают значительно меньшей массой. Это особенно важно при ремонте старых сооружений, где дополнительная нагрузка может негативно сказаться на общей устойчивости конструкции.

Широкое распространение получили также методы инъекционного ремонта с использованием полимерных составов. В процессе ремонта в трещины и пустоты под давлением вводятся эпоксидные или полиуретановые композиции, которые заполняют внутренние дефекты и восстанавливают монолитность конструкции. Подобные технологии позволяют пре-

дотвращать дальнейшее проникновение влаги и существенно замедляют развитие коррозионных процессов.

Таким образом, высокая прочность, коррозионная стойкость и технологичность делают композитные системы эффективной альтернативой традиционным методам усиления. Особенно значимым является возможность выполнения ремонтных работ без существенного увеличения массы сооружения и без длительного вывода объекта из эксплуатации.

Список использованных источников

1. Передерий, Г.П. Курс мостов: конструкция, проектирование и расчет. Ч.1: Мосты малых пролетов. Каменные, деревянные и железные / Г.П. Передерий. – 4 изд. – М.: Госиздат, 1929 – 750 с.

2. Иванов, А.Н. Проблемы применения полимерных композиционных материалов в несущих конструкциях железнодорожных мостов / А.Н. Иванов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 3. – С. 29-37.

POLYMER COMPOSITE MATERIALS IN BRIDGE AND OVERPASS RESTORATION SYSTEMS

P.D. Shirokova

*St. Petersburg Polytechnic University Peter the Great,
St. Petersburg, Russia*

The main causes of the destruction of bridges and overpasses are analyzed. The advantages of polymer composite materials for their repair and restoration are considered.

Keywords: *bridges, overpasses, transport structures, polymer composite materials.*

УДК 614

ЛАЗЕРНОЕ СКАНИРОВАНИЕ ВЫСОТНЫХ ОБЪЕКТОВ В СИСТЕМЕ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

В.А. Щапов

*Дальневосточный государственный университет путей сообщения,
г. Хабаровск, Россия*

Проведен анализ причин возникновения деформационных процессов в высотных сооружениях, рассмотрены современные методы мобильного лазерного сканирования и их роль в безопасности эксплуатации зданий.

Ключевые слова: *лазерное сканирование, высотные сооружения, пожарная безопасность, деформации, геодезический контроль.*

Рост этажности объектов, усложнение архитектурных решений и повышение эксплуатационных нагрузок приводят к необходимости совер-

шенствования методов контроля технического состояния строительных конструкций.

Особую актуальность данная проблема приобретает в контексте обеспечения пожарной безопасности высотных объектов. Как известно, высотные конструкции характеризуются повышенной чувствительностью к температурным воздействиям вследствие значительной протяжённости элементов, сложной схемы распределения нагрузок и высокой концентрации напряжений в отдельных узлах. При возникновении пожара наблюдаются следующие основные виды деформационных процессов:

- температурное расширение металлических элементов;
- потеря прочности бетона при нагреве;
- возникновение остаточных прогибов перекрытий;
- изменение пространственной геометрии каркаса;
- локальные смещения несущих элементов;
- нарушение вертикальности колонн и стен;
- образование трещин и пластических деформаций.

Особую опасность представляет неравномерный нагрев конструкций, приводящий к развитию внутренних напряжений и последующей потере устойчивости элементов, так как в условиях пожара скорость развития деформационных процессов может быть крайне высокой, что требует применения методов оперативного контроля.

Следует отметить, что после ликвидации пожара многие деформации сохраняются в виде остаточных изменений геометрии конструкций. И поэтому их своевременное выявление является необходимым условием принятия решений о возможности дальнейшей эксплуатации объекта.

Все это из-за того, что в условиях пожара строительные материалы подвергаются серьезным физико-механическим изменениям, а именно, металлические элементы теряют устойчивость, бетонные конструкции разрушаются под воздействием температурных нагрузок, а соединительные узлы деформируются вследствие неравномерного нагрева. Подобные процессы приводят к изменению пространственной геометрии здания, образованию прогибов, смещений и отклонений несущих элементов от проектного положения.

В этом контексте особый научный и практический интерес представляет применение технологий лазерного сканирования, позволяющих получать высокоточные пространственные данные о состоянии конструкций в короткие сроки: систематическое наблюдение за изменением геометрических параметров сооружения позволяет выявлять деформационные процессы на ранних стадиях их развития и своевременно принимать меры по предотвращению разрушений.

Лазерное сканирование представляет собой современный метод получения пространственной информации об объектах посредством измерения расстояний до поверхности с использованием лазерного луча. Результатом сканирования является облако точек – совокупность координат, описывающих геометрию объекта в трёхмерном пространстве.

Принцип работы лазерного сканера основан на определении времени прохождения лазерного импульса либо фазового сдвига отражённого сигнала. Современные сканирующие системы способны фиксировать миллионы точек в секунду с высокой точностью измерений.

В зависимости от способа размещения оборудования выделяют следующие виды лазерного сканирования:

1. наземное;
2. мобильное;
3. воздушное;
4. беспилотное.

Для задач обследования высотных конструкций наиболее широкое применение получило наземное лазерное сканирование, обеспечивающее высокую детализацию данных и возможность работы в условиях плотной городской застройки.

В процессе движения транспортного средства лазерный сканер непрерывно фиксирует координаты точек поверхности объекта, формируя так называемое облако точек. Современные системы способны регистрировать миллионы измерений за короткий промежуток времени, что позволяет создавать высокоточные трехмерные модели сооружений. Для обеспечения высокой точности съемки дополнительно используются спутниковые навигационные системы. Одновременно со сканированием выполняется фотосъемка объекта и прилегающей территории. Обычно используются широкоугольные камеры, работающие с ограниченной частотой кадров, что позволяет избежать перегрузки системы чрезмерным объемом информации. Фотоматериалы необходимы для анализа состояния объекта и присвоения облаку точек реальных цветовых характеристик.

Мобильное лазерное сканирование представляет собой современный метод пространственной съемки объектов, основанный на использовании лазерных сканеров, установленных на подвижной платформе. Как правило, оборудование размещается на крыше автомобиля, оснащенного системой амортизации, снижающей влияние вибраций на точность измерений.

При обследовании высотных объектов применяется специальная технология движения сканирующей системы. Маршрут автомобиля обычно формируется по спиральной траектории вокруг сооружения. Такой подход обеспечивает постепенное увеличение плотности точек и позволяет получить наиболее точную модель верхних участков конструкции, где каждый виток спирали формирует более тысячи отдельных измерительных кадров. После завершения съемки программное обеспечение выполняет сортировку данных, удаление повторяющихся измерений и объединение информации в единое облако точек. При этом для верхних частей сооружения часть дублирующих измерений сохраняется, поскольку данные участки наиболее подвержены воздействию внешних факторов и требуют повышенной точности анализа.

В случае выявления выпадающих или некорректных измерений отдельные участки маршрута сканируются повторно. Это позволяет исклю-

чить появление ошибок и повысить достоверность цифровой модели объекта. Особое внимание при обследовании высотных сооружений уделяется так называемым «теневым зонам». Они возникают в тех случаях, когда часть конструкции оказывается недоступной для прямого лазерного луча вследствие особенностей геометрии объекта. Для устранения подобных участков применяется дополнительная фотосъемка и повторное сканирование с различных направлений.

После завершения полевых работ выполняется обработка результатов сканирования. На данном этапе осуществляется объединение отдельных облаков точек, их пространственная привязка и фильтрация ошибок. Для контроля точности используются специальные реперные объекты, закрепленные в характерных точках конструкции.

Результатом обработки становится создание трехмерной цифровой модели объекта. Такие модели позволяют детально анализировать геометрию сооружения, выявлять отклонения от проектного положения и оценивать развитие деформационных процессов.

Использование цифровых моделей значительно упрощает проведение мониторинга и повышает эффективность анализа технического состояния конструкции.

Итак, одним из главных преимуществ мобильного лазерного сканирования является высокая точность измерений, так как в отличие от традиционных методов геодезического контроля технология позволяет получать полную пространственную информацию о состоянии объекта с минимальными погрешностями. Дополнительным преимуществом является высокая скорость выполнения работ

Следует отметить и высокий уровень безопасности проведения обследований, поскольку измерения выполняются дистанционно, необходимость непосредственного нахождения специалистов в опасных зонах существенно сокращается.

Таким образом, мобильное лазерное сканирование является одним из методов мониторинга высотных объектов в системе пожарной безопасности, так как технология позволяет получать высокоточные пространственные данные о состоянии конструкций, выявлять деформационные процессы на ранних стадиях и оперативно оценивать последствия чрезвычайных ситуаций.

Список использованных источников

1. Азаров Б.Ф. Современные методы геодезических наблюдений за деформациями инженерных сооружений // Ползуновский вестник. – Барнаул, 2011. – № 1. – С. 19-29.
2. Опыт применения наземного лазерного сканирования при обследовании инженерных сооружений / Д.А. Афонин [и др.] // Геодезия и картография. – 2020. – Т. 81. № 4. – С. 2-8.

LASER SCANNING OF HIGH-RISE OBJECTS IN THE FIRE SAFETY SYSTEM

V.A. Shchapov

*Far Eastern State University of Railway Transport,
Khabarovsk, Russia*

The analysis of the causes of deformation processes in high-rise structures is carried out, modern methods of mobile laser scanning and their role in ensuring the safety of buildings are considered.

Keywords: *laser scanning, high-rise buildings, fire safety, deformations, geodetic control.*

УДК 614

КОРРОЗИЯ АРМАТУРНОЙ СТАЛИ КАК ФАКТОР СНИЖЕНИЯ ОГНЕСТОЙКОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В.А. Щапов

*Дальневосточный государственный университет путей сообщения,
г. Хабаровск, Россия*

Одним из важнейших преимуществ железобетона является его сравнительно высокая огнестойкость, но в процессе длительной эксплуатации железобетонные конструкции подвергаются воздействию агрессивных факторов окружающей среды, что может привести к постепенному ухудшению их эксплуатационных характеристик.

Ключевые слова: *железобетонные конструкции, арматурная сталь, коррозия, огнестойкость, пожарная безопасность.*

Сочетание бетона и арматурной стали обеспечивает совместную работу материалов, при которой бетон воспринимает сжимающие усилия, а арматура – растягивающие, благодаря чему железобетон используется при строительстве жилых и общественных зданий, мостов, тоннелей, и прочих объектах инфраструктуры.

Одним из ключевых преимуществ железобетона является способность сохранять несущую способность при воздействии высоких температур в течение определённого времени, однако, эксплуатация конструкций в агрессивных средах сопровождается развитием коррозионных процессов в арматурной стали, что существенно изменяет поведение железобетона при пожаре.

Коррозия арматуры является одной из наиболее распространённых причин преждевременного разрушения строительных конструкций. По мере развития коррозии уменьшается площадь поперечного сечения стержней, нарушается сцепление арматуры с бетоном, появляются трещины и

происходит разрушение защитного слоя. Итогом, в железобетонных конструкциях арматурная сталь в нормальных условиях защищена щелочной средой бетона, благодаря которой на поверхности металла образуется пассивная плёнка, препятствующая развитию коррозии. Однако при нарушении защитных свойств бетона начинается разрушение арматуры, сопровождающееся образованием ржавчины, снижением прочности стали и повреждением бетонного слоя.

Основными причинами коррозии арматуры являются:

- карбонизация бетона;
- проникновение хлоридов;
- повышенная влажность;
- циклическое замораживание и оттаивание;
- воздействие агрессивных химических сред;
- наличие трещин в бетоне.

Карбонизация сопровождается снижением щелочности бетона вследствие взаимодействия гидроксида кальция с углекислым газом воздуха. При уменьшении значения pH до критического уровня пассивное состояние арматуры нарушается и начинается электрохимическая коррозия.

Хлоридная коррозия особенно характерна для мостовых сооружений, морских платформ и конструкций, эксплуатируемых в условиях применения противогололёдных реагентов. Хлорид-ионы локально разрушают пассивную плёнку и вызывают интенсивное разрушение стали.

Получается, что особенно интенсивно коррозия развивается в конструкциях, эксплуатируемых в условиях повышенной влажности, морского климата и химически агрессивной среды. К таким объектам относятся мостовые сооружения, подземные конструкции, резервуары, гидротехнические объекты и промышленные здания. В подобных условиях происходит ускоренное разрушение арматурной стали, что существенно снижает надёжность и срок службы железобетонных конструкций.

В условиях пожара перечисленные дефекты становятся особенно опасными, поскольку железобетон подвергается одновременному воздействию высоких температур и механических нагрузок. И при наличии коррозионных повреждений огнестойкость конструкции существенно снижается, так как под воздействием высоких температур в бетоне происходят сложные физико-химические процессы. Уже при температуре около 100 °C начинается испарение свободной влаги, а при дальнейшем нагреве развивается дегидратация цементного камня, а в диапазоне температур 300–400 °C существенно снижается прочность бетона, увеличивается его пористость и развивается система микротрещин. При температурах выше 500 °C начинается интенсивное разрушение структуры цементного камня. Арматурная сталь также теряет прочность при нагреве: при температуре 500–600 °C предел текучести стали значительно уменьшается, снижается модуль упругости и возрастает деформативность конструкции. Если арматура уже ослаблена коррозией, то процесс потери несущей способности происходит значительно быстрее.

Трещины и повреждения защитного слоя бетона, возникающие вследствие коррозии, становятся каналами для быстрого проникновения тепла к арматуре. В результате стальные стержни быстрее достигают критической температуры, а предел огнестойкости конструкции уменьшается, и, кроме того, разрушение защитного слоя способствует взрывообразному откалыванию бетона при пожаре, что ещё больше ускоряет нагрев арматуры и потерю несущей способности конструкции.

В последние годы большое внимание уделяется разработке способов повышения долговечности и огнестойкости железобетонных конструкций, где одним из наиболее эффективных направлений считается использование комплексных органоминеральных добавок, способных изменять структуру цементного камня и улучшать эксплуатационные характеристики бетона.

Комплексные органоминеральные добавки представляют собой сочетание минеральных компонентов и химических веществ, влияющих на процессы гидратации цемента и структурообразования бетона. В качестве минеральных компонентов используются молотый кварцевый песок, гранулированный шлак, известняк, микрокремнезем и измельчённый керамический кирпич. В состав химических добавок входят ускорители твердения, суперпластификаторы и ингибиторы коррозии.

Проведённые исследования показали, что использование подобных модификаторов способно существенно повысить раннюю прочность бетона и ускорить процессы твердения, а наиболее высокие показатели прочности были получены при использовании добавок, содержащих сульфат натрия.

Высокая эффективность подобных составов объясняется активизацией процессов гидратации цемента и формированием более плотной структуры цементного камня, и, особенно положительное влияние на свойства бетона оказывает молотый кварцевый песок. Благодаря высокой дисперсности данный материал способствует образованию высокопрочных гидросиликатов кальция и уменьшению пористости цементного камня. Молотый известняк также демонстрирует высокую эффективность в составе органоминеральных модификаторов, так как способствует снижению водопотребности бетонной смеси и позволяет уменьшить водоцементное отношение. В результате чего формируется более плотная структура бетона с повышенной прочностью и устойчивостью к проникновению влаги и агрессивных веществ. Уплотнение структуры бетона имеет большое значение для защиты арматурной стали от коррозии. Чем ниже проницаемость бетона, тем сложнее влаге, кислороду и хлоридам проникать к поверхности арматуры. Это способствует сохранению пассивного состояния стали и замедлению процессов коррозионного разрушения.

При этом, необходим правильный подбор состава бетонной смеси и соблюдение технологии производства, поскольку повышение плотности бетона, снижение его пористости и уменьшение водоцементного отношения позволяют существенно повысить устойчивость конструкций к агрессивным воздействиям окружающей среды. Для дополнительной защиты арматуры применяются антикоррозионные покрытия, катодная защита,

гидроизоляционные материалы и специальные огнезащитные составы. Большое значение имеет также регулярный контроль технического состояния конструкций и своевременное проведение ремонтно-восстановительных работ.

Таким образом, развитие коррозионных процессов приводит к разрушению защитного слоя бетона, снижению прочности арматуры и ускоренному нагреву конструкции при пожаре, а использование современных комплексных органоминеральных добавок позволяет повысить прочность и плотность бетона, однако эффективность подобных модификаторов должна оцениваться с учётом их влияния на процессы коррозии арматуры.

Список использованных источников

1. Москвин В.М. [и др.]. Коррозия бетона и железобетона. Методы их защиты. – М.: Стройиздат, 1980. – 536 с.
2. Ройтман В.М. Особенности проектирования огнестойкости конструкций и зданий при комбинированных особых воздействиях с участием пожара // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Т. 22, № 7.
3. Овчинникова С.Т. Коррозия и антикоррозионная защита железобетонных мостовых конструкций // Интернет журнал «Науковедение». – 2014. – №5 (24).

CORROSION OF REINFORCING STEEL AS A FACTOR IN REDUCING THE FIRE RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

V.A. Shchapov

*Far Eastern State University of Railway Transport,
Khabarovsk, Russia*

One of the most important advantages of reinforced concrete is its relatively high fire resistance, but during long-term operation reinforced concrete structures are exposed to aggressive environmental factors, which can lead to a gradual deterioration of their performance characteristics.

Keywords: *reinforced concrete structures, reinforcing steel, corrosion, fire resistance, fire safety.*

УДК 614

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ПОЖАРНЫХ РИСКОВ НА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТАХ

В.А. Щапов

*Дальневосточный государственный университет путей сообщения,
г. Хабаровск, Россия*

Пожары на предприятиях сопровождаются значительными материальными потерями, нарушением производственных процессов, загрязнением окружающей среды и угрозой жизни и здоровью работников. Именно поэтому обеспече-

ние пожарной безопасности занимает важное место в системе промышленной безопасности любого предприятия.

Ключевые слова: пожарные риски, производственные объекты, пожарная безопасность, промышленная безопасность.

Пожары на производственных объектах являются одной из наиболее опасных форм чрезвычайных ситуаций, так их последствия могут носить масштабный характер и затрагивать не только территорию предприятия, но и прилегающие районы.

Цель данной статьи заключается в анализе основных пожарных рисков на территории производственных объектов, выявлении факторов их возникновения и рассмотрении современных методов предупреждения.

Пожарный риск представляет собой вероятность возникновения пожара и связанных с ним последствий для людей, имущества и окружающей среды. В научной и нормативной литературе пожарный риск рассматривается как совокупность вероятности опасного события и тяжести его последствий.

На производственных объектах уровень пожарного риска зависит от следующих факторов:

- наличия горючих и взрывоопасных веществ;
- особенностей технологического процесса;
- состояния инженерных коммуникаций;
- уровня автоматизации производства;
- технического состояния оборудования;
- квалификации персонала;
- эффективности системы противопожарной защиты.

В современных условиях управление пожарными рисками основывается не только на соблюдении нормативных требований, но и на системном анализе опасностей, позволяющем выявлять потенциальные угрозы ещё на стадии проектирования или эксплуатации объекта, так как даже сама производственная среда отличается высокой концентрацией потенциально опасных факторов. На предприятиях химической, нефтегазовой, металлургической и энергетической отраслей используются вещества с высокой степенью воспламеняемости и взрывоопасности. Кроме того, многие технологические процессы связаны с воздействием высоких температур, повышенного давления и электрической энергии, что дополнительно увеличивает вероятность возникновения аварий.

Важность анализа пожарных рисков обусловлена необходимостью предотвращения чрезвычайных ситуаций ещё на стадии проектирования и эксплуатации объекта. В этом контексте комплексный анализ пожарных рисков представляет собой совокупность методов и средств, направленных на выявление потенциальных источников опасности, оценку вероятности возникновения пожаров, прогнозирование последствий аварийных ситуаций и разработку мероприятий по их предотвращению.

Одной из наиболее распространённых причин пожаров на производственных объектах является нарушение технологических процессов: несоблюдение параметров температуры, давления или концентрации веществ может привести к воспламенению материалов и образованию взрывоопасной среды. Особенно опасны подобные ситуации на предприятиях нефтехимической промышленности, где даже незначительное отклонение от установленного режима работы способно вызвать масштабную аварию.

Также серьёзную угрозу представляет неисправность электрооборудования: короткие замыкания, повреждение изоляции, перегрузка электрических сетей и искрение контактов часто становятся причиной возникновения пожаров. Данная проблема усугубляется эксплуатацией устаревших инженерных систем и недостаточным уровнем технического обслуживания оборудования. Дополнительным фактором риска является физический износ оборудования и инженерных коммуникаций. Коррозия трубопроводов, разрушение резервуаров, утечка горючих веществ и неисправность систем вентиляции способны привести к быстрому распространению огня и возникновению взрывоопасной ситуации.

И, конечно, нарушение правил пожарной безопасности, неправильное хранение горючих веществ, проведение огневых работ без необходимых мер защиты и недостаточная квалификация персонала существенно повышают вероятность возникновения чрезвычайных ситуаций.

Комплексный анализ пожарных рисков включает использование качественных и количественных методов оценки, где качественный анализ основан на экспертной оценке состояния производственного объекта и выявлении потенциально опасных участков, а количественный подход предполагает применение математических моделей для определения вероятности возникновения пожара и оценки масштабов его последствий.

Именно поэтому, современные системы анализа пожарных рисков активно используют цифровое моделирование. Компьютерные технологии позволяют прогнозировать распространение огня, движение дымовых потоков, воздействие высоких температур на строительные конструкции и время эвакуации персонала. Использование специализированных программных комплексов существенно повышает точность расчётов и позволяет разрабатывать более эффективные меры защиты. Например, в рамках системы «FireRisks», которая предназначена для автоматизации процессов анализа и управления пожарными рисками на производственных объектах. Основной задачей системы является поддержка принятия решений в области промышленной безопасности.

Система позволяет выполнять сбор и обработку информации о состоянии производственных объектов, проводить моделирование аварийных ситуаций и прогнозировать последствия возможных пожаров. Важной особенностью является возможность анализа взаимодействия объектов между собой. Например, авария на одном резервуаре может привести к те-

пловому воздействию на соседние установки и вызвать цепную реакцию распространения пожара.

Объектами могут выступать резервуары, трубопроводы, насосные станции, системы вентиляции, производственные установки и средства пожаротушения, ведь каждый объект обладает уникальными параметрами, влияющими на уровень пожарной опасности. Например, объект «Резервуар» может содержать такие атрибуты, как объём, давление, температура, тип хранимого вещества и уровень заполнения. Методы объекта позволяют рассчитывать массу пролива жидкости, площадь распространения разлива и объём выделяющихся паров. Система также может учитывать возможные события, включая разгерметизацию, разрушение резервуара и воспламенение паровоздушной смеси. А использование объектно-ориентированного подхода позволяет формировать иерархию классов, в которой базовые классы содержат общие свойства, а производные классы описывают особенности конкретных типов оборудования. Такая архитектура обеспечивает гибкость системы и возможность её дальнейшего расширения.

Применение веб-технологий обеспечивает удалённый доступ к системе и возможность оперативного мониторинга состояния объекта в режиме реального времени. Это особенно важно для крупных предприятий, имеющих территориально распределённую инфраструктуру.

Важно понимать, что возможные пожары на промышленных предприятиях сопровождаются серьёзными экономическими, социальными и экологическими последствиями. Материальный ущерб может включать уничтожение оборудования, разрушение зданий и остановку производственных процессов. В отдельных случаях крупные аварии приводят к полной остановке деятельности предприятия. Поэтому профилактические мероприятия направлены на предотвращение возникновения пожаров: регулярное техническое обслуживание оборудования, контроль состояния электрических сетей, проверку исправности противопожарных систем и мониторинг технологических параметров.

Таким образом, управление пожарными рисками возможно только при комплексном сочетании технических, организационных и цифровых методов защиты, где своевременная модернизация оборудования, внедрение интеллектуальных систем мониторинга и повышение уровня подготовки персонала являются основными условиями безопасной эксплуатации производственных объектов и минимизации последствий возможных пожаров.

Список использованных источников

1. Монашков В.В. Системы управления промышленной и пожарной безопасностью. Управление пожарной безопасностью: учебное пособие / В.В. Монашков – СПб: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2018.

COMPREHENSIVE ANALYSIS OF FIRE RISKS AT PRODUCTION FACILITIES

V.A. Shchapov

*Far Eastern State University of Railway Transport,
Khabarovsk, Russia*

Fires at enterprises are accompanied by significant material losses, disruption of production processes, environmental pollution and a threat to the life and health of employees. That is why ensuring fire safety occupies an important place in the industrial safety system of any enterprise.

Keywords: fire risks, production facilities, fire safety, industrial safety.

УДК 621.7

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПРИЁМОПЕРЕДАТОЧНОГО УСТРОЙСТВА СТАНКА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АРМИРОВАННОЙ КОЛЮЧЕЙ ЛЕНТЫ

М.А. Юдин, А.Е. Шаралапов

*Пензенский государственный университет,
г. Пенза, Россия*

В данной статье представлен вариант усовершенствования конструкции приемопередаточного устройства станка, предназначенного для изготовления армированной колючей ленты.

Ключевые слова: армированная колючая лента, приемопередаточное устройство, дисковая муфта, автоматическая линия, оцинкованная лента.

Заграждение – техническое средство, функционирующее как искусственное препятствие, предназначенное для ограничения доступа на подлежащую охране территорию. Классификационный ряд подобных устройств включает железобетонные, засыпные, козырьковые и иные разновидности. Конструктивное исполнение заграждений козырькового типа предусматривает применение армированной колючей ленты (АКЛ), поставляемой в двух формах – скрученной либо завальцованной.

В производстве армированной колючей ленты (АКЛ) используются два типа исходных материалов: оцинкованная стальная лента (толщина – 0,55 мм) и высокоуглеродистая оцинкованная стальная проволока (диаметр – 2,5 мм). Указанные материалы регламентируются соответственно ГОСТ 3559-75 и ГОСТ 7372-79. К числу зарубежных аналогов АКЛ относятся модели ВТО-10, ВТО-12, ВТО-18, ВТО-22, СВТ-65 и другие, конструкция которых предусматривает применение проволоки и лент, изготовленных из сталей марок SS430, SS304, SS304L, SS316, SS316L.

Для крупносерийного выпуска продукции используются автоматизированные комплексы, в частности линия по производству спиральной колючей ленты Concertina Razor Wire Line компании Bergandy Machinery, а также высокоскоростные прецизионные линии для колючей проволоки компании Fine Fasteners Industry Co. Высокая стоимость зарубежного оборудования и его техническое обслуживание приводит потребителей к замене импортных образцов на изделия произведённые в Российской Федерации.

В качестве макетной модели предложен комплекс оборудования, с использованием которого можно изготавливать колючую ленту из оцинкованной стальной ленты с завальцовкой в неё стальной проволоки. Завершающая операция технологического цикла – намотка получаемого изделия в спирали, диаметр которых может варьироваться. Кинематическая схема устройства предусматривает следующее: движение приводного барабана осуществляется посредством передаточного механизма, включающего в себя зубчатые и ремённые передачи, что приводит в работу рольганг данного станка. Приемное устройство, представляет из себя намоточный барабан с механизмом раскладки, который осуществляет работу с использованием гибкой передачи и отдельного привода.

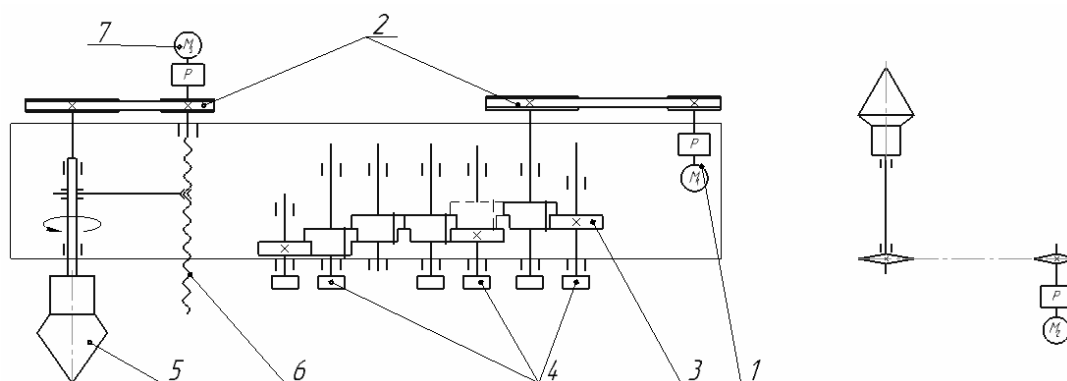


Рисунок 1 – Кинематическая схема станка для изготовления АКЛ (макетный образец)

При проверке работоспособности данного оборудования было выявлено, что в данной макетной модели использование нескольких приводов, приводящих к недостаточной синхронизации работы всего оборудования комплекса. Это приводит к дополнительному техническому обслуживанию модулей, входящих в структуру комплекса.

В усовершенствованной конструкции станка автомата предложено применение одного привода, производящего подачу, изготовление, намотку и движение АКЛ. Такое решение обеспечивает синхронизацию между скоростями барабана и обжимного блока, а также регулировать крутящий момент с помощью дисковой муфты. Введение винтовой передачи с разжимной гайкой устраняет потери времени, при совершении реверсивного движения.

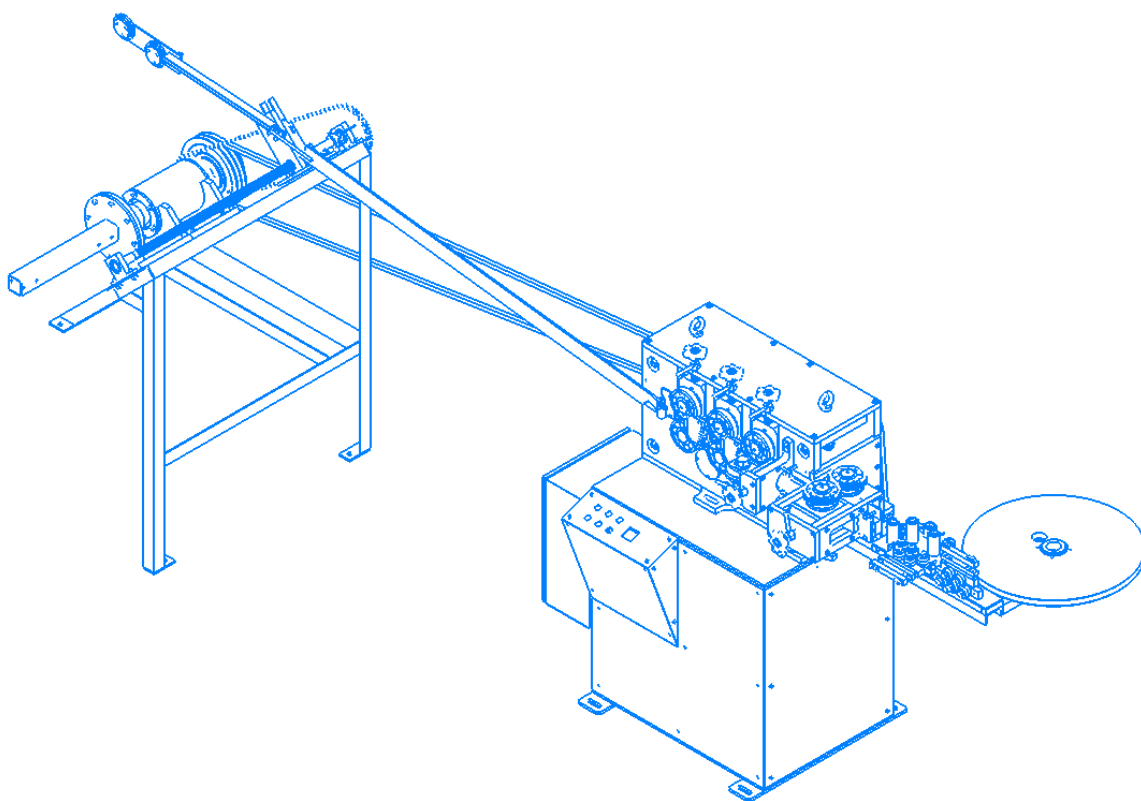


Рисунок 2 – Схема станка
с модернизированным приемопередающим устройством

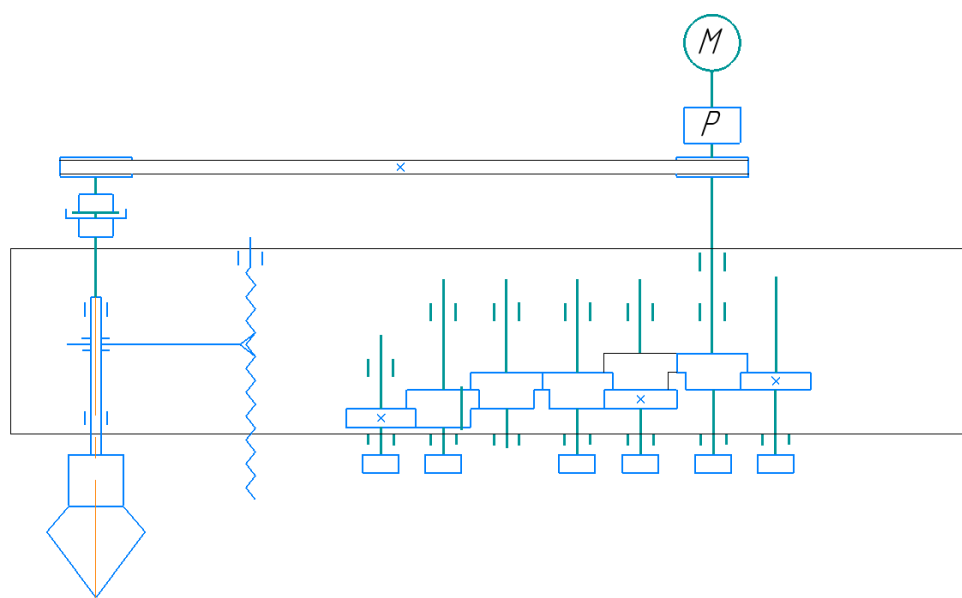


Рисунок 3 – Кинематическая схема станка
с модернизированным приемопередающим устройством

Благодаря модернизации конструктивного исполнения приёмопередаточного устройства достигается значительное увеличение качественных характеристик и производительности оборудования. Кроме того, данное решение обеспечивает выполнение задач по импортозамещению в технологическом процессе выпуска армированной колючей ленты (АКЛ).

Список использованных источников

1. Большаков Г.С. Привод приёмного устройства станка для изготовления армированной колючей ленты / Г.С. Большаков, А.В. Токарев, А.Е. Шаралапов // Журнал Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2019. – № 3. – С. 102–104. – DOI: 10.26160/2541-8637-2019-3-102-104, EDN: YZFIOI.

2. Дедов А.С. Составление и расчет кинематических схем машин и механизмов / А.С. Дедов. – Новосибирск: Издательство: Новосибирский государственный университет (Сибстрин), 2016. – EDN: NRNWAJ.

IMPROVEMENT OF THE DESIGN OF THE RECEIVING AND TRANSFER DEVICE OF THE MACHINE FOR MANUFACTURING REINFORCED BARBED TAPE

M.A. Yudin, A.E. Sharalapov

*Penza State University,
Penza, Russia*

This article presents a design improvement option for the receiving and transfer device of a machine intended for manufacturing reinforced barbed tape.

Keywords: reinforced barbed tape, receiving and transfer device, disc clutch, automatic line, galvanized steel strip.

УДК: 628.16+628.161+628.162

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЯ И ДЕМАНГАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИ НАЛИЧИИ В НИХ ЦВЕТНОСТИ И МУТНОСТИ

И.С. Алифьев, И.А. Лушкин, Д.А. Борисов

*Группа компаний Водные Системы, г. Тольятти, Россия
Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, Россия*

В статье рассмотрены технологические аспекты обезжелезивания и демангации подземных вод при наличии в них повышенных показателей цветности мутности. Предложена технологическая схема очистки воды с применением реагентов для снижения показателей цветности и мутности, а также обработки промывных вод. Для очистки воды применяется трехступенчатое фильтрование с предварительной аэрацией и первичным хлорированием.

Ключевые слова: обезжелезивание, демангация, мутность, цветность, реагенты, коагуляция, фильтрация, дисковый фильтр, трехступенчатое фильтрование.

Очистку воды от марганца следует проводить безреагентным методом. В случае, если безреагентный метод не обеспечивает требуемую степень очистки, следует предусматривать обработку воды реагентами-

окислителями (хлор, перманганат калия, озон и др.) с введением флокулянта и последующим фильтрованием. Стоит отметить, что «железо и марганец присутствующих совместно в подземных водах на действующих станциях обезжелезивания, использующих технологию аэрации с последующим фильтрованием, из воды удаляется только железо. При применении сильных окислителей, марганец окисляется и сорбируется только после железа, так как железо является более легко окисляемым элементом. Соответственно совместная очистка железа и марганца в одной ступени фильтрационных сооружений возможна только при их малой концентрации, и применением окислителей» [1].

На основании показателей качества воды из водозаборных скважин и сети хозяйственно питьевого водоснабжения выявлен основной перечень загрязняющих веществ с максимальными показателями:

- железо 2,9 мг/л;
- марганец 0,78 мг/л;
- цветность 202 градусов;
- мутность 26,8 ЕМФ.

В исходной воде присутствует железо и марганец. Обезжелезивание подземных возможно фильтрованием в сочетании с одним из способов предварительной обработки воды:

- упрощенной аэрацией;
- аэрацией на специальных устройствах;
- введением реагентов-окислителей.

Для реализации очистки воды от железа и марганца принимается предварительная аэрация и первичное хлорирование. Аэрация принята для экономии реагента окислителя и сокращению эксплуатационных затрат. Кроме того, в исходной присутствуют показатели цветности и мутности. Для снижения показателей цветности и мутности принимается реагентная обработка воды с дальнейшим трехступенчатым фильтрованием рисунок 1.

Подземные воды под давлением поступают в комплектную станцию водоподготовки в усреднитель 1 объемом 30 м³.

Затем насосной станцией повышения давления 2 подается на аэрацию. В качестве аэратора принята аэрационная труба 3 которая является системой напорной аэрации воды. Система напорной аэрации предназначена для насыщения воды кислородом воздуха и для последующего удаления из воды газов и других загрязнений, обуславливающих ухудшение органолептических качеств воды.

Аэрированная вода поступает в камеру смешения 4. Камера смешения оборудована перемешивающими устройствами. В камеру смешения подаются реагенты для обработки воды: хлор, коагулянт, флокулянт [1...5]. Используемые реагенты и материалы представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Потребность в реагентах станции водоподготовки

№ п/п	Наименование реагента	ГОСТ, ТУ	Количество товарного продукта		Примечание
			т/сут	т/год	
1	Гипохлорит натрия	ГОСТ 11086-76	0,00364	1,3286	Поставка в пластиковой таре 25 кг
2	Коагулянт Аква-Аурат 18	ТУ 2163-069-00205067-2007	0,1137	41,501	Поставка в пластиковой (еврокуб)
3	Флокулянта катионный марки Flopat FO 41154990	–	0,00084	0,30741	Поставка в мешках 25 кг
4	Флокулянт анионный Flopat AN 905 SH (Флопам AN 905 SH)	–	0,0012	0,438	Поставка в мешках 25 кг
5	Щавелевая кислота	ГОСТ 22180-76	0,0003 (т/мес)	0,1	Поставка в мешках 25 кг
6	Фильтрующий материал Сорбент АС 0.7-1.4 мм	–	–	3,6	Поставка в мешках 15 кг,
7	Фильтрующий материал Сорбент МС 0.7-1.4 мм	–	–	4,5	Поставка в мешках 25 кг,
8	Уголь кокосовый активированный	NWC 12×40 Regular	–	4,68	Поставка в мешках 25 кг, еврокуб

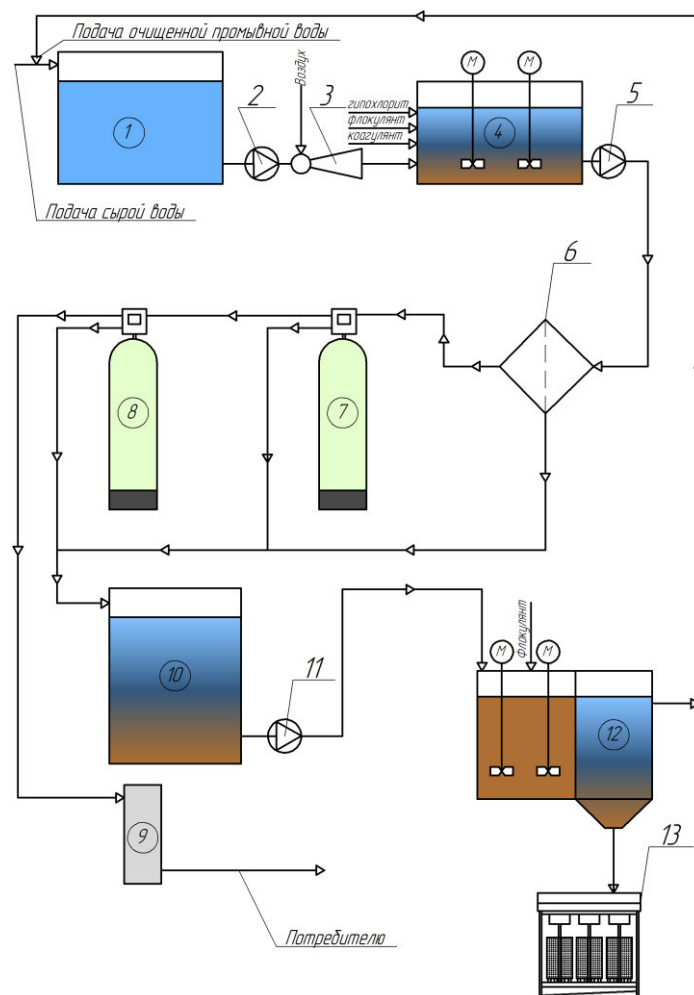


Рисунок 1 – Технологическая схема обработки воды

Из камеры смешения вода, обработанная реагентами, насосной станцией повышения давления 5 подается по трубопроводу на первичную фильтрацию. В качестве первой ступени фильтрации предусматривает автоматический самопромывной дисковый фильтр 6.

После дисковых фильтров вода поступает на вторую ступень фильтрации 7.

Система фильтрации с автоматическим управлением представляет собой напорный фильтр, который в зависимости от вида загрузки способна удалять железо, марганец, механические частицы, органические вещества, тяжелые металлы и нитраты и т.д. В качестве загрузки принимается сорбент АС и МС. Исходная вода через верхнее распределительное устройство поступает внутрь корпуса фильтра, заполненного фильтрующей загрузкой. В процессе фильтрации механические примеси задерживаются в слое загрузки [6].

Вода после второй ступени фильтрации поступает на напорные фильтры третьей ступени 8. В качестве загрузки применяется уголь кокосовый активированный.

Очищенные воды поступают на установку ультрафиолетового обеззараживания 9, предварительно проходя вторичное хлорирование. Процесс ультрафиолетового обеззараживания происходит в корпусе из нержавеющей стали. Внутри нее располагается бактерицидная лампа в кварцевом чехле. Именно лампа обеззараживает ультрафиолетом воду, делая ее хозяйственно – питьевого качества В1.

Промывные воды от фильтров поступают в накопитель промывных вод 10, из которого насосами 11 подается в шламонакопитель 12.

Для обработки промывных вод используется шламонакопитель 12. В шламонакопитель подается раствор коагулянта и флокулянта для улучшения осветления промывных вод. Шламонакопитель оборудован устройством перемешивания реагентов с промывной водой и тонкослойным модулем для улучшения процесса отстаивания. Осветленные промывные воды поступают в «голову станции» в усреднитель 1. Осадок из шламонакопителя поступает в обезвоживатель 13. В качестве обезвоживателя применяется иловый фильтр (мешочного типа), состоящий из емкости-накопителя с патрубками, и фильтрационными мешками (рисунок 2).

В фильтрационном мешке происходит разделение твердой и жидкой фракций осадка через полотно мешка под давлением осадка и воздуха. Влажность осадка после обезвоживателя составляет 75-80%. Иловый фильтр выполняется из нержавеющей стали. Фильтрационный мешок устанавливается в металлическую поддерживающую сетку. Иловый фильтр оборудован поддоном для сбора фильтрационной воды. Мешки в дальнейшем могут транспортироваться на площадки хранения твердых бытовых отходов или складирования.

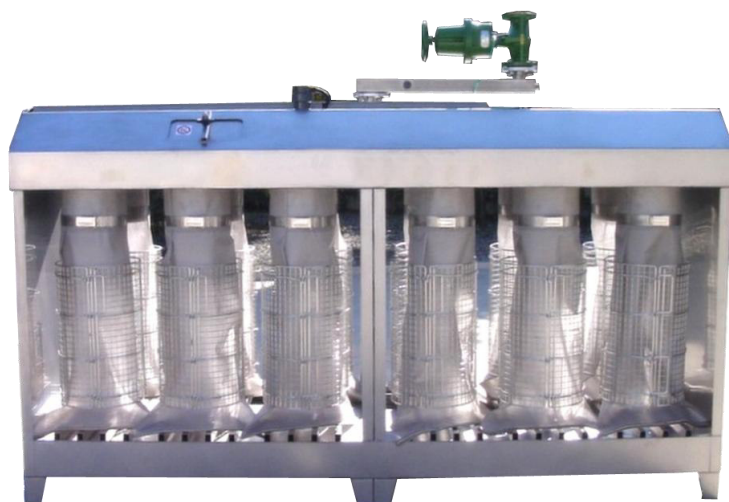


Рисунок 2 – Обезжелезиватель мешочного типа

Предложенная технологическая схема обезжелезивания и деманганации позволяет очистить подземную воду при наличии в ней цветности и мутности, и довести до показателей питьевого качества.

Список использованных источников

1. Браяловский Г.Б., Мигалатий Е.В., Никифоров А.Ф. Деманганация подземных вод на обновляющемся каталитическом слое // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2015. – № 2. – С. 85–89.
2. Очистка воды с применением способа концентрированного коагулирования / И.А. Лушкин, М.А. Сафронов, А.С. Кочергин, А.В. Демков // Градостроительство, реконструкция и инженерное обеспечение устойчивого развития городов Поволжья: сборник трудов IV Всероссийской научно-практической конференции (заочной), Тольятти, 16–18 сентября 2015 года. – Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2015. – С. 133–137. – EDN UKAGOT.
3. Кинетика процесса коагуляции при реагентной обработке природной воды в присутствии контактных сред / В.Г. Камбург, М.А. Сафронов, И.А. Лушкин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2014. – № 12(672). – С. 40–46. – EDN TMLZRZ.
4. Очистка воды поверхностного источника с применением безреагентных способов интенсификации процессов коагуляции / М.А. Сафронов, И.А. Лушкин, А.С. Кочергин, А.А. Зебрев // Новый университет. Серия: Технические науки. – 2014. – № 12(34). – С. 57–62. – EDN TIKDCR.
5. Коагуляционная обработка воды в присутствии диспергированных пузырьков воздуха / К.Л. Чертес, М.А. Сафронов, И.А. Лушкин [и др.] // Водоочистка. – 2017. – № 12. – С. 36–43. – EDN NXIWXR.
6. Рысин А.С., Лушкин И.А., Алифьев И.С. Установки очистки подземных вод от железа и марганца на территории г.о. Тольятти и Ставропольского района Самарской Области // Города России: проблемы строительства, инженерного обеспечения, благоустройства и экологии : сборник статей XVIII Международной научно-практической конференции, Пенза, 26–27 апреля 2016 года / Международная академия наук экологии и безопасности жизнедеятельности; Академия водохозяйственных наук РФ; Волжское отделение Российской академии архитектуры и строительных наук; Тольяттинский государственный университет;

TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR IRON REMOVAL AND DEMANGANATION OF UNDERGROUND WATERS WITH COLOR AND TURBIDITY

I.S. Alifyev, I.A. Lushkin, D.A. Borisov

Water Systems Group of Companies, Tolyatti, Russia

Tolyatti State University, Tolyatti, Russia

The article discusses the technological aspects of iron removal and demanganation of underground waters with elevated color and turbidity. A technological scheme for water treatment using reagents to reduce color and turbidity, as well as for treating wash water, has been proposed. Three-stage filtration with pre-aeration and primary chlorination is used for water treatment.

Keywords: iron removal, manganese removal, turbidity, color, reagents, coagulation, filtration, disk filter, three-stage filtration.

УДК 628.3.03

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ КОМБИНИРОВАННОЙ СХЕМЫ ОЧИСТКИ ГОРОДСКОГО ЛИВНЕВОГО СТОКА

В.О. Дегтярев

ООО «Атмосфера», г. Тольятти, Россия

Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, Россия

В статье рассмотрена применимость комбинированной механико-сорбционной схемы для очистки городского ливневого стока. Обоснована необходимость последовательного удаления загрязнений с учётом их физического состояния: крупные включения задерживаются решёткой, минеральные частицы – песколовкой, осаждаемые взвеси – отстойником, свободные нефтепродукты – нефтеуловителем, остаточные загрязнения – сорбционным фильтром. Выполнена расчётная оценка снижения концентраций взвешенных веществ и нефтепродуктов. Показана технологическая целесообразность сорбционной доочистки после механического удаления основной массы загрязнений.

Ключевые слова: ливневый сток, поверхностные сточные воды, нефтепродукты, взвешенные вещества, песколовка, отстойник, нефтеуловитель, сорбционный фильтр, комбинированная очистка.

Рост площади водонепроницаемых покрытий в городах приводит к увеличению объёма поверхностного стока и усложнению его состава. Дождевые и талые воды, перемещаясь по автомобильным дорогам, парковкам, внутриквартальным проездам и промышленным площадкам, смывают песок, дорожную пыль, частицы износа покрытий, нефтепродукты и дру-

гие загрязняющие вещества. Поэтому городской ливневый сток следует рассматривать как самостоятельный объект водоотведения, требующий сбора и очистки перед сбросом в водный объект или систему водоотведения.

Особенность ливневого стока состоит в нерегулярном поступлении и высокой изменчивости концентраций загрязняющих веществ. Наиболее загрязнённой является начальная часть дождевого события, когда происходит смыв загрязнений, накопленных на поверхности в сухой период. Это снижает эффективность отдельных методов очистки и обосновывает применение многоступенчатых технологических схем.

Целью статьи является оценка применимости комбинированной механико-сорбционной схемы очистки городского ливневого стока. В качестве технологического решения рассматривается последовательность: приёмная камера с решёткой, песколовка, отстойник, нефтеуловитель, сорбционный фильтр и контрольный колодец. Такая схема ориентирована на поэтапное удаление загрязнений в зависимости от их крупности, плотности и способности к осаждению, всплытию или сорбции. Пример комбинированного песко-нефтеуловителя с сорбционным блоком представлен на рисунке 1.

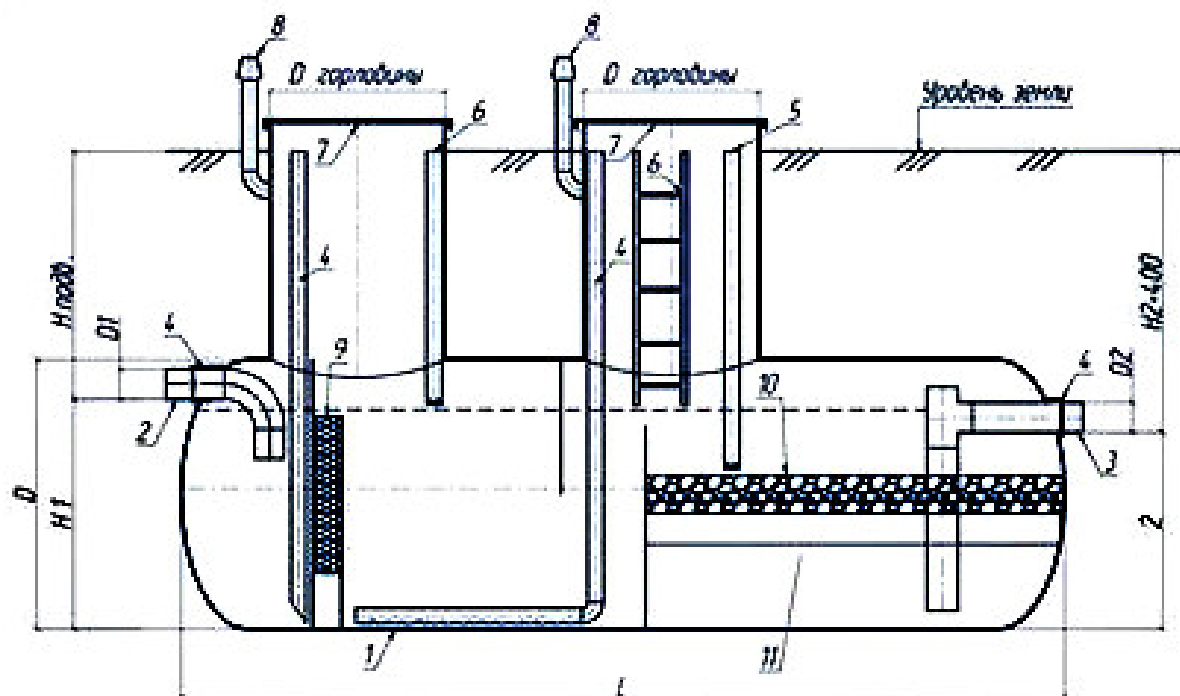


Рисунок 1 – Песко-нефтеуловитель с сорбционным блоком

- 1 – корпус; 2 – подводящий трубопровод; 3 – отводящий трубопровод;
- 4 – стояк откачки осадка; 5 – стояк откачки нефтепродуктов; 6 – лестница;
- 7 – люк обслуживания; 8 – вентиляционный стояк; 9 – коалесцентный модуль;
- 10 – блок с кварцевой загрузкой; 11 – блок с угольной загрузкой

Приёмная камера с решёткой выполняет защитную функцию и задерживает крупные включения. Песколовка предназначена для удаления песка и тяжёлых минеральных частиц, снижающих ресурс последующих соору-

жений. Отстойник обеспечивает гравитационное осаждение основной массы взвешенных веществ. Нефтеуловитель выделяет свободные и частично диспергированные нефтепродукты, а сорбционный фильтр выполняет завершающую доочистку от остаточных нефтепродуктов и мелкодисперсных примесей.

Расчёт остаточной концентрации загрязняющего вещества после каждой стадии выполнен по зависимости [1, 2, 3]:

$$C_{\text{после}} = C_{\text{до}} \cdot (1 - \mathcal{E} / 100),$$

где $C_{\text{после}}$ – концентрация после стадии очистки, мг/дм³;

$C_{\text{до}}$ – концентрация до стадии очистки, мг/дм³;

$\mathcal{E}$ – эффективность удаления загрязняющего вещества, %. Расчёт выполнен последовательно: концентрация после одной ступени принята исходной для следующей.

Исходные данные: $C_{\text{вв}} = 300$ мг/дм³ и $C_{\text{нп}} = 8,0$ мг/дм³.

Принятая эффективность стадий очистки стока:

- песколовка – $\mathcal{E}_{\text{вв}} = 15\%$ и $\mathcal{E}_{\text{нп}} = 5$;
- отстойник – $\mathcal{E}_{\text{вв}} = 55\%$ и $\mathcal{E}_{\text{нп}} = 15\%$;
- нефтеуловитель $\mathcal{E}_{\text{вв}} = 10\%$ и $\mathcal{E}_{\text{нп}} = 70\%$;
- сорбционный фильтр – $\mathcal{E}_{\text{вв}} = 60\%$ и $\mathcal{E}_{\text{нп}} = 98\%$.

Расчет динамика изменения концентрации взвешенных веществ и нефтепродуктов представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Динамика изменения концентрации

Стадия очистки	Взвешенные вещества, мг/дм ³	Нефтепродукты, мг/дм ³
Исходный сток	300,00	8,000
После песколовки	255,00	7,600
После отстойника	114,75	6,460
После нефтеуловителя	103,28	1,938
После сорбционного фильтра	41,31	0,039
Общая эффективность	86,23 %	99,52 %

По сравнению с реагентными методами и флотационной очисткой механико-сорбционная схема отличается меньшей сложностью эксплуатации и не требует непрерывного дозирования химических реагентов. Это позволяет эффективно использовать её на локальных очистных сооружениях поверхностного водоотведения городских территорий. При этом стабильность работы системы во многом зависит от качественного удаления песка и взвешенных веществ на предварительных стадиях очистки [4, 5, 6].

Эксплуатация очистных сооружений предусматривает регулярную очистку решёток, удаление накопленного песка из песколовки, извлечение осадка из отстойника, сбор отделённых нефтепродуктов из нефтеуловителя, а также своевременную замену или регенерацию сорбционной загрузки.

ки. Контрольный колодец, расположенный после сорбционного фильтра, обеспечивает возможность отбора проб и контроля качества очищенной воды.

Рассмотренная комбинированная механико-сорбционная схема может быть рекомендована для очистки типового городского ливневого стока, в котором основными загрязняющими веществами являются взвешенные вещества и нефтепродукты.

Применение комбинированной схемы очистки обеспечивает снижение концентрации взвешенных веществ с 300 до 41,31 мг/дм³, а нефтепродуктов с 8,0 до 0,039 мг/дм³. Эффективность очистки составляет 86,23% – по взвешенным веществам, и 99,52 % – по нефтепродуктам. Использование сорбционного фильтра в качестве завершающей стадии очистки после механической очистки обеспечивает достижение требуемых показателей качества очищенной воды.

Список использованных источников

1. СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85. – М.: Минстрой России, 2018.
2. Приказ Федерального агентства по рыболовству от 26.05.2025 № 296 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения».
3. Приказ Минприроды России от 29.12.2020 № 1118 «Об утверждении Методики разработки нормативов допустимых сбросов загрязняющих веществ в водные объекты для водопользователей».
4. Галкин Ю.А. Разработка системы очистки сточных вод ливневой и промышленно-ливневой канализации крупных городов и промышленных предприятий // Градостроительство и архитектура. – 2012. – № 4(8). – С. 64–70.
5. Кунденко С.Б., Волкова В.Н. Технология очистки ливневых вод причальных сооружений перевалки древесины // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2024. – Т. 32, № 4. – С. 422–430. – DOI: 10.22363/2313-2310-2024-32-4-422-430. – EDN: NINDLF.
6. Сколубович Ю.Л., Войтов Е.Л., Цыба А.А., Балчугов Д.А., Белоногов Д.Е. Технология очистки и утилизации поверхностных сточных вод и осадков // Academia. Архитектура и строительство. – 2020. – № 1. – С. 131–137. – DOI: 10.22337/2077-9038-2020-1-131-137. – EDN: TVLNUI.

ASSESSMENT OF THE APPLICABILITY OF A COMBINED TREATMENT SCHEME FOR URBAN STORMWATER RUNOFF

V.O. Degtyarev

*LLC «Atmosphere», Tolyatti, Russia
Togliatti State University, Togliatti, Russia*

The article considers the applicability of a combined mechanical and sorption scheme for the treatment of urban stormwater runoff. The proposed technological sequence includes a screen, a grit chamber, a settling tank, an oil separator and a sorption filter. A calculation assessment of suspended solids and petroleum products removal was

performed. The results confirm the expediency of sorption post-treatment after mechanical removal of mineral impurities and separation of free petroleum products.

Keywords: *stormwater runoff, surface wastewater, petroleum products, suspended solids, grit chamber, settling tank, oil separator, sorption filter, combined treatment.*

УДК 628.16.06

РАЗРАБОТКА СООРУЖЕНИЙ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОЧИСТКИ ВОДЫ ИЗ ИСТОЧНИКОВ С ОБИЛЬНОЙ ВОДНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ

Н.С. Зюрин

ООО «Атмосфера»,
г. Тольятти, Россия

В статье рассматривается проблема предварительной очистки воды, забираемой из поверхностных источников с интенсивным развитием водной растительности. Актуальность темы обусловлена тем, что водозаборы, расположенные на водохранилищах и малопроточных участках рек, в летне-осенний период подвергаются повышенной нагрузке со стороны макрофитов, нитчатых водорослей, фитопланктона и органического детрита. Указанные загрязнения вызывают засорение водоприемных окон, рост потерь напора на решетках и сетчатых устройствах, увеличение частоты промывок, ухудшение условий работы насосных станций первого подъема и дополнительную нагрузку на последующие сооружения водоподготовки. Цель исследования состоит в обосновании комбинированной схемы предварительной очистки воды для условий г. Тольятти, где в качестве источника рассматривается р. Волга в пределах Куйбышевского водохранилища. Предложена технологическая последовательность, включающая боновое заграждение, водоприемные окна с пониженной скоростью входа, сороудерживающие решетки, сетчатую камеру и барабанные микросетки. Показано, что применение такой схемы позволяет задерживать значительную часть биогенных загрязнений до поступления воды на основные сооружения водоподготовки, снизить вероятность аварийных засорений и повысить устойчивость работы системы в период максимальной биологической нагрузки.

Ключевые слова: *водозабор, предварительная очистка, водная растительность, фитопланктон, микросетки, решетки, водоподготовка, Куйбышевское водохранилище, Тольятти.*

Поверхностные источники водоснабжения крупных городов подвержены сезонной изменчивости качества воды. Для водохранилищ и участков рек с замедленным водообменом характерно развитие эвтрофикации, сопровождающееся увеличением биомассы фитопланктона, накоплением органического вещества и зарастанием прибрежных зон высшей водной растительностью. В инженерной практике такие процессы рассматриваются не только как экологическая проблема, но и как фактор, непосредственно влияющий на надежность работы водозаборных сооружений.

Наиболее существенные эксплуатационные осложнения возникают в период массового развития макрофитов и водорослей. Растительная масса поступает к водоприемным окнам, задерживается на решетках, сетках и фильтрующих элементах, образует волокнистые скопления и повышает гидравлическое сопротивление сооружений. Одновременно фитопланктон и продукты распада биомассы увеличивают мутность, цветность, окисляемость и хлорпоглощаемость воды, что отрицательно сказывается на последующих стадиях водоподготовки.

В качестве расчетного объекта в статье рассматривается водозаборный узел г. Тольятти производительностью $60000 \text{ м}^3/\text{сут}$, работающий на воде р. Волги в пределах Куйбышевского водохранилища. Такой выбор обусловлен тем, что водохранилищный режим источника создает условия для сезонного прогрева воды, ветрового сгона плавающей растительности и развития планктонных сообществ. Численность населения г. Тольятти на 01.01.2025 составляет 662683 человека [1], поэтому вопросы надежности водоснабжения имеют выраженное социальное и инженерное значение.

Исходные данные сформированы на основании анализа условий водоснабжения г. Тольятти, особенностей р. Волги в пределах Куйбышевского водохранилища и требований действующих нормативных документов. При выборе источника и разработке проектной схемы учитывались положения ГОСТ 2761-84, устанавливающего гигиенические и технические требования к источникам централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения [2]. Требования к проектированию сооружений наружного водоснабжения принимались по СП 31.13330.2021 [3], а санитарные требования к качеству воды - по СанПиН 1.2.3685-21 [4].

Расчетная производительность проектируемого сооружения принята равной $60000 \text{ м}^3/\text{сут}$. Данное значение рассматривается как производительность отдельного водозаборного узла, обслуживающего часть городской системы водоснабжения, а не весь город. Такой подход позволяет выполнить проектный расчет сооружения с реальными расходами, не перегружая исследование избыточной детализацией общегородской системы.

Неблагоприятным расчетным периодом принят летне-осенний интервал, когда вероятность поступления растительной массы и фитопланктона в водоприемную зону максимальна. Для оценки работы сооружений использованы расчетные показатели качества исходной воды: концентрация растительных включений $0,20 \text{ кг/м}^3$, биомасса фитопланктона 55 мг/л , содержание взвешенных веществ 60 мг/л , органический детрит 40 мг/л . Эти значения применены как проектные для проверки схемы в условиях повышенной биологической нагрузки.

Методика расчета включала последовательное определение расчетного расхода, площади водоприемных окон, параметров решеток и сетчатых устройств, требуемой фильтрующей поверхности барабанных микросеток, массы задерживаемых загрязнений и расхода промывной воды. Расходы определялись на максимальный часовой режим работы. При двух рабочих технологических линиях расход на одну линию составил $0,417 \text{ м}^3/\text{с}$.

Расчет площади водоприемного окна выполнялся по допустимой скорости подхода воды. При скорости 0,15 м/с требуемая живая площадь окна на одну линию составила 2,78 м². С учетом коэффициента живого сечения и запаса на засорение принята габаритная площадь окна 6,0 м². Фактическая скорость подхода воды при этом составляет 0,143 м/с, что снижает вероятность активного втягивания плавающей растительности к водоприемным устройствам.

Таблица 1 – Расчетные исходные данные
для проектирования сооружений предварительной очистки

Показатель	Принятое значение	Основание принятия
Объект проектирования	водозаборный узел г. Тольятти	принятая расчетная постановка задачи
Источник водоснабжения	р. Волга, Куйбышевское водохранилище	фактическое положение города у водохранилища
Назначение воды	хозяйственно-питьевое водоснабжение	ГОСТ2761-84, СП31.13330.2021
Производительность узла	60000 м ³ /сут	проектное допущение для части городской системы
Расчетный часовой расход	3000 м ³ /ч	расчет при коэффициенте часовой неравномерности 1,2
Секундный расход	0,833 м ³ /с	перевод часового расхода в секундный
Число линий	2 рабочие и 1 резервная	требование надежности и ремонтно-пригодности
Расход на одну рабочую линию	0,417 м ³ /с	распределение расхода между двумя рабочими линиями
Расчетный период	июль-сентябрь	период максимальной биологической нагрузки

Расчет площади водоприемного окна выполнялся по допустимой скорости подхода воды. При скорости 0,15 м/с требуемая живая площадь окна на одну линию составила 2,78 м². С учетом коэффициента живого сечения и запаса на засорение принята габаритная площадь окна 6,0 м². Фактическая скорость подхода воды при этом составляет 0,143 м/с, что снижает вероятность активного втягивания плавающей растительности к водоприемным устройствам.

Параметры сетчатых устройств и барабанных микросеток определялись по гидравлической нагрузке на фильтрующую поверхность. Для сетчатой камеры принята площадь 4,2 м² на линию. Для барабанной микросетки расчетная фильтрующая поверхность принята 18 м² на линию, что обеспечивает удаление части фитопланктона и мелкодисперсной органики перед подачей воды на основные сооружения водоподготовки.

По результатам анализа существующих решений и расчетных параметров принята комбинированная схема предварительной очистки, вклю-

чающая последовательно работающие элементы: направляющее боновое заграждение, водоприемные окна с пониженной скоростью входа, соросдерживающие решетки, сетчатую камеру, барабанные микросетки, камеру очищенной воды и насосную станцию первого подъема. Назначение такой схемы состоит в поэтапном снижении биологической нагрузки: крупные фрагменты растительности задерживаются на первых стадиях, волокнистые включения - на сетчатых устройствах, а фитопланктон и мелкодисперсная органика - на микросетках.

В отличие от традиционной схемы, основанной только на решетках грубой очистки, комбинированное решение распределяет нагрузку между несколькими элементами. Это уменьшает вероятность аварийного засорения одного устройства, повышает устойчивость работы в период цветения воды и создает условия для автоматизированной промывки фильтрующих поверхностей.

Таблица 2 – Основные расчетные параметры разработанной схемы предварительной очистки

Элемент схемы	Расчетный параметр	Принятое значение	Функциональное назначение
Водоприемное окно	площадь на одну линию	6,0 м ²	снижение скорости входа и риска втягивания растительности
Решетка грубой очистки	прозор	40 мм	задержание крупных фрагментов макрофитов
Сетчатая камера	площадь сетчатой поверхности	4,2 м ²	удаление волокнистых включений и нитчатых водорослей
Барабанная микросетка	фильтрующая поверхность	18 м ²	задержание фитопланктона и мелкодисперсной органики
Промывная система	расход промывной воды	30 м ³ /ч на линию	автоматическое восстановление пропускной способности
Удаление биомассы	производительность	не менее 16 т/сут	исключение накопления и загнивания задержанной массы

Расчетная масса биогенных загрязнений, поступающих на сооружения в неблагоприятный период, определена по принятому расходу воды и расчетным концентрациям. Для растительных включений при концентрации 0,20 кг/м³ поступление составляет 12000 кг/сут. При эффективности задержания 90% масса удаляемых растительных включений составляет 10800 кг/сут. Для фитопланктона при биомассе 55 мг/л поступление составляет 3300 кг/сут, из которых барабанные микросетки и предшествующие элементы задерживают ориентировочно 1815 кг/сут.

Суммарная расчетная масса задержанных биогенных загрязнений составляет 15075 кг/сут. Данный показатель является ключевым для обоснования системы промывки и удаления задержанной растительной массы. Поэтому в схеме предусмотрены автоматизированные промывные устройства, емкость усреднения промывных вод и ограничение времени накопления за-

держанной биомассы не более 8 часов. Расчетный суточный объем промывных вод принят равным $120 \text{ м}^3/\text{сут}$, а требуемый объем емкости усреднения с запасом – 150 м^3 .

Таблица 3 – Расчетная эффективность задержания биогенных загрязнений

Вид загрязнений	Поступает, кг/сут	Задерживается, кг/сут	Эффективность, %	Основной элемент задержания
Растительные включения	12000	10800	90	решетки, сетчатая камера
Фитопланктон	3300	1815	55	барабанные микросетки
Взвешенные вещества	3600	1620	45	сетчатая камера, микросетки
Органический детрит	2400	840	35	сетчатые устройства, микросетки
Итого	21300	15075	72	комбинированная схема

Технологическая эффективность разработанной схемы проявляется в снижении нагрузки на последующие сооружения водоподготовки. Удаление крупной растительной массы перед насосной станцией уменьшает вероятность засорения рабочих колес насосов, снижает риск аварийных остановок и повышает стабильность подачи воды. Удаление части фитопланктона и органического детрита до основных стадий обработки способствует снижению мутности, цветности и органической нагрузки на коагуляцию, отстаивание и фильтрование.

Эксплуатационная надежность обеспечивается за счет многоступенчатого задержания загрязнений, резервирования технологических линий и автоматизации промывки. При выводе одной линии на обслуживание сохраняется возможность подачи воды через рабочие линии. Наличие датчиков перепада уровней позволяет включать промывку не по фиксированному времени, а по фактическому загрязнению фильтрующих поверхностей, что повышает адаптивность сооружения к сезонным колебаниям качества воды.

Экономический эффект схемы имеет преимущественно эксплуатационный характер. Несмотря на увеличение состава оборудования по сравнению с традиционными решетками, ожидается снижение затрат, связанных с аварийной очисткой водоприемных камер, внеплановыми остановками насосов, сокращением фильтроциклов и повышенным расходом реагентов. Дополнительным преимуществом является возможность локализованного удаления растительной массы до ее поступления в основные сооружения водоподготовки.

Сравнение с традиционной схемой показывает, что применение только решеток грубой очистки недостаточно для источников с обильной водной растительностью. Такие устройства задерживают крупные включения, но не обеспечивают устойчивого удаления нитчатых водорослей, фито-

планктона и мелкодисперсной органики. Разработанная схема устраняет этот недостаток за счет последовательного перехода от грубого механического задержания к тонкой сетчатой и микросетчатой очистке.

Полученные результаты подтверждают, что проектирование предварительной очистки для источников с обильной растительностью должно выполняться не только по расходу воды, но и по биологической нагрузке. В условиях Куйбышевского водохранилища расчетный неблагоприятный период связан с поступлением растительных включений, фитопланктона и органического детрита. Если эти компоненты не удаляются на ранней стадии, они переносятся на насосное оборудование и основные сооружения водоподготовки, что ухудшает режим всей системы [5].

Принятая схема не заменяет последующие процессы водоподготовки, а выполняет защитную и разгрузочную функцию. Ее задача состоит в том, чтобы стабилизировать качество воды, поступающей на основные сооружения, и предотвратить резкое увеличение эксплуатационной нагрузки в период цветения воды. Поэтому эффективность предварительной очистки следует оценивать не только по снижению концентраций, но и по предотвращению аварийных режимов, сохранению пропускной способности и уменьшению частоты внеплановых промывок.

Ограничением исследования является расчетный характер исходных данных по концентрациям биогенных загрязнений. Для рабочего проектирования необходимы натурные наблюдения за качеством воды в районе конкретного водозабора, включая сезонные измерения фитопланктона, взвешенных веществ, цветности, окисляемости и массы растительных включений. Тем не менее расчетно-аналитический подход позволяет предварительно обосновать компоновку сооружения и определить основные параметры оборудования.

Результатом научной работы обуславливается разработка и обоснование комбинированной схемы сооружений предварительной очистки воды для водозаборного узла г. Тольятти производительностью 60000 м³/сут, использующего воду р. Волги в пределах Куйбышевского водохранилища. Схема которой включает в себя последовательное применение бонового заграждения, водоприемных окон с пониженной скоростью входа, сороудерживающих решеток, сетчатой камеры и барабанных микросеток.

Расчетные параметры показывают, что при секундном расходе 0,833 м³/с и двух рабочих линиях расход на одну линию составляет 0,417 м³/с. Принятая площадь водоприемного окна 6,0 м² обеспечивает фактическую скорость подхода воды 0,143 м/с, что снижает риск втягивания растительности. Фильтрующая поверхность барабанной микросетки 18 м² на линию обеспечивает задержание части фитопланктона и мелкодисперсной органики.

Суммарная масса задерживаемых биогенных загрязнений в расчетный неблагоприятный период составляет 15075 кг/сут. Это подтверждает необ-

ходимость устройства системы автоматической промывки, удаления задержанной биомассы и предотвращения вторичного загрязнения. Разработанное решение позволяет повысить надежность водозабора, снизить нагрузку на основные сооружения водоподготовки и обеспечить более устойчивый режим работы системы в летне-осенний период.

Список использованных источников

1. Тольятти в цифрах / Официальный портал администрации городского округа Тольятти. URL: <https://tgl.ru/tgl-in-figures>
2. ГОСТ 2761-84. Источники централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения. Гигиенические, технические требования и правила выбора.
3. СП 31.13330.2021. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.02-84.
4. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.
5. Журба М.Г., Соколов Л.И., Говорова Ж.М. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений. – М.: Издательство АСВ, 2010.
6. Справочник по водоподготовке / Российская ассоциация водоснабжения и водоотведения. – М., 2021.

DEVELOPMENT OF FACILITIES FOR PRE-TREATMENT OF WATER FROM SOURCES WITH ABUNDANT AQUATIC VEGETATION

N.S. Zyurin

*LLC «Atmosphere», Tolyatti, Russia
Togliatti State University, Togliatti, Russia*

The article discusses the problem of pre-treatment of water taken from surface sources with intensive development of aquatic vegetation. The relevance of the topic is due to the fact that water intakes located in reservoirs and low-flow river sections are exposed to increased stress from macrophytes, filamentous algae, phytoplankton and organic detritus in the summer and autumn period. These pollutants cause clogging of water intake windows, increased pressure losses on grilles and mesh devices, increased frequency of flushing, deterioration of working conditions of pumping stations of the first lift and additional load on subsequent water treatment facilities. The purpose of the study is to substantiate a combined water pre-treatment scheme for the conditions of Tolyatti, where the Volga River within the Kuibyshev reservoir is considered as a source. A technological sequence is proposed, including a boom barrier, water intake windows with a reduced entry speed, water-retaining grilles, a mesh chamber and drum microgrids. It is shown that the use of such a scheme makes it possible to delay a significant part of biogenic pollutants before water enters the main water treatment facilities, reduce the likelihood of emergency blockages and increase the stability of the system during the period of maximum biological load.

Keywords: *water intake, pretreatment, aquatic vegetation, phytoplankton, microgrids, grids, water treatment, Kuibyshev reservoir, Tolyatti.*

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВОДОПОДГОТОВКИ КОТЕЛЬНОЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

М.Д. Кузьмин

Тольяттинский государственный университет,
г. Тольятти, Россия

В статье рассмотрены вопросы повышения эффективности системы водоподготовки котельной малой мощности на примере котельной №4 г.о.Тольятти. Выполнен анализ существующей схемы на основе Na-катионирования, выявлены её основные недостатки: отсутствие удаления растворённых газов и механических примесей, недостаточный уровень автоматизации. Предложена модернизированная технологическая схема, включающая фильтр механической очистки, узел химической деаэрации с дозированием сульфита натрия и дополнительные средства контроля. Выполнены расчёты параметров оборудования и расхода реагентов. Показано, что предложенные мероприятия позволяют снизить содержание растворённого кислорода не менее чем на 90%, уменьшить коррозионную активность воды и повысить надёжность работы котельной при минимальных капитальных затратах.

Ключевые слова: водоподготовка, котельная малой мощности, Na-катионирование, химическая деаэрация, сульфит натрия, коррозия, подпиточная вода.

Повышение надёжности и экономической эффективности децентрализованного теплоснабжения в значительной степени определяется качеством воды, используемой для подпитки котлов и тепловых сетей. Источники водоснабжения котельных малой мощности часто не соответствуют нормативным требованиям по содержанию солей жёсткости, растворённого кислорода и углекислоты, что приводит к накипеобразованию и коррозии. Существующие системы водоподготовки на многих объектах базируются на устаревших решениях, не обеспечивающих комплексной обработки воды.

Целью настоящей работы является разработка технически обоснованных и экономически целесообразных мероприятий по модернизации системы водоподготовки котельной малой мощности (на примере котельной №4 г.о.Тольятти).

Исходными данными служили проектная документация котельной №4, результаты эксплуатационных измерений расхода и состава воды, а также нормативные документы (РД 24.031.120-91, приказ Минэнерго №511). Анализ существующей системы выполнен методом технической диагностики с оценкой соответствия параметров оборудования фактическим режимам работы. Расчёт производительности фильтров проведён по стандартным методикам фильтрования. Потребность в реагенте для химической деаэрации определена исходя из стехиометрического соотношения реакции связывания кислорода сульфитом натрия ($2\text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{Na}_2\text{SO}_4$) с коэффициентом запаса 1,3. Оценка эконо-

мической эффективности выполнена по методу срока окупаемости капитальных затрат [4].

Котельная предназначена для теплоснабжения противотуберкулёзного диспансера, установленная тепловая мощность – 2,9 Гкал/ч, фактическая нагрузка – около 0,37 Гкал/ч. Расход сетевой воды – 12 т/ч, подпитки – 0,03–0,04 м³/ч (около 1 м³/сут). Существующая система водоподготовки включает два параллельных Na-катионитных фильтра диаметром 700 мм, бак подпиточной воды и подпиточные насосы. Анализ показал, что схема обеспечивает умягчение, но не удаляет растворённые газы (кислород, углекислоту) и механические примеси, имеет недостаточную автоматизацию, что способствует коррозии и загрязнению оборудования.

Для устранения этих недостатков предложена модернизированная технологическая схема, включающая:

- установку фильтра механической очистки на входе исходной воды;
- узел химической деаэрации (ёмкость 50 л, насос-дозатор) для введения сульфита натрия;
- дополнительные средства контроля (манометры, сигнализаторы уровня, счётчик объёма воды);
- оптимизацию регенерации катионитных фильтров по объёму обработанной воды.

Предлагаемая схема сохраняет существующие Na-катионитные фильтры, так как их производительность достаточна (расчётная скорость фильтрации 2,5 м/ч при допустимом диапазоне 10–20 м/ч для периодического режима). Фильтр механической очистки (сетчатый или засыпной) устанавливается на входе исходной воды для задержания взвешенных частиц размером более 100 мкм, что предотвращает загрязнение ионообменных смол. Узел химической деаэрации включает герметичную ёмкость для 5% раствора сульфита натрия и мембранный насос-дозатор с регулируемой подачей. Введение реагента организовано в трубопровод перед баком подпиточной воды, где за счёт длительного пребывания (более 80 ч) обеспечивается полное связывание кислорода. Контроль осуществляется по показаниям манометров (перепад на фильтрах), сигнализаторам уровня и счётчику объёма, что позволяет перейти на регенерацию катионитных фильтров не по времени, а по фактическому объёму обработанной воды [1, 2, 3, 4].

Расчёт показал, что существующие фильтры обеспечивают требуемую производительность (скорость фильтрации ~2,5 м/ч при допустимой 10–20 м/ч). Для связывания растворённого кислорода (расчётная концентрация 8 мг/л) требуется 56 мг сульфита натрия на литр, что при суточном объёме подпитки 0,96 м³ даёт 70 г/сут. Принята дозирующая установка с ёмкостью 50 л (запас на 35 суток). Время контакта реагента в баке подпитки (объём 3,5 м³) составляет ~87 часов, что достаточно для завершения реакции даже при пониженной температуре.

Ожидаемая технико-эксплуатационная эффективность:

- снижение содержания растворённого кислорода с 8–9 мг/л до менее 0,5 мг/л (более 90%);
- уменьшение коррозионных повреждений и загрязнения теплообменных поверхностей;
- снижение расхода поваренной соли на регенерацию на 10–15%.

Технико-экономическое обоснование (таблица 1) показало, что капитальные затраты на модернизацию составляют около 105 тыс. руб., годовой экономический эффект (за счёт снижения ремонтов, экономии топлива и реагентов) – 50–65 тыс. руб., срок окупаемости – 1,5–2,5 года. Предложенные решения безопасны (сульфит натрия – 3 класс опасности, работа с ним регламентирована) и экологичны (незначительное увеличение солесодержания сточных вод).

Выполненные расчёты подтвердили, что существующие фильтры справляются с задачей умягчения при фактической подпитке 0,04 м³/ч. Межрегенерационный период при работе по объёму составит около 15–20 суток, что снижает расход поваренной соли на 12% по сравнению с регенерацией по фиксированному времени.

Химическая деаэрация обеспечивает остаточное содержание кислорода менее 0,05 мг/л, что соответствует нормам для закрытых систем теплоснабжения (приказ №511). При этом образование сульфатов (Na₂SO₄) не превышает 0,5 мг/л, что не влияет на солесодержание [5].

Сравнение показало, что предложенная технологическая схема по капитальным затратам в пять раз дешевле альтернативных, а также проще в обслуживании. Основной возможной проблемой может быть замедление реакции при низкой температуре воды зимой, однако длительное время контакта в баке (более 3 суток) нивелирует этот фактор.

Таблица 1 – экономический эффект

Статья затрат / экономии	Сумма, тыс. руб./год
Капитальные затраты (оборудование + монтаж)	105 (разово)
Экономия соли на регенерации	1,5–2
Экономия на ремонтах и обслуживании	25–35
Экономия топлива (1–2% от расхода)	20–30
Итого годовой эффект	50–65

Таким образом, предложенная модернизация позволяет при минимальных инвестициях существенно повысить надёжность и долговечность оборудования котельной малой мощности. Разработанные решения могут быть рекомендованы к внедрению на аналогичных объектах.

Список использованных источников

1. Водоподготовка и водно-химические режимы в теплоэнергетике: учебное пособие / А.С. Копылов, В.Ф. Очков, Ю.В. Чудова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2021. – 416 с.

2. Кострикин, Ю.М. Водоподготовка и водный режим энергообъектов низкого и среднего давления: справочник / Ю.М. Кострикин, Н.А. Мещерский, О.В. Коровина. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 248 с.

3. РД 24.031.120-91. Методические указания. Нормы качества сетевой и подпиточной воды водогрейных котлов... – М.: Минтяжмаш СССР, 1991.

4. Шарапов, В.И. Низкотемпературная деаэрация воды в теплоэнергетических установках: монография / В.И. Шарапов, О.В. Пазушкина, Е.В. Мингараева. – Ульяновск: УлГТУ, 2020. – 203 с.

5. Приказ Минэнерго России от 14.05.2025 № 511 «Об утверждении Правил технической эксплуатации объектов теплоснабжения и теплопотребляющих установок».

IMPROVEMENT OF THE WATER TREATMENT SYSTEM FOR A LOW-POWER BOILER HOUSE

M.D. Kuzmin

*Togliatti State University,
Togliatti, Russia*

The article discusses issues of improving the efficiency of the water treatment system for a low-power boiler house using the example of Boiler House No. 4 in Tolyatti. An analysis of the existing Na-cation exchange scheme is carried out, its main disadvantages are identified: the absence of dissolved gas and mechanical impurity removal, insufficient automation. A modernized process flow diagram is proposed, including a mechanical cleaning filter, a chemical deaeration unit with sodium sulfite dosing, and additional monitoring means. Calculations of equipment parameters and reagent consumption are performed. It is shown that the proposed measures make it possible to reduce the dissolved oxygen content by at least 90%, decrease the corrosive activity of water, and increase the reliability of the boiler house operation at minimal capital costs.

Keywords: water treatment, low-power boiler house, Na-cation exchange, chemical deaeration, sodium sulfite, corrosion, make-up water.

УДК 66.081.63

РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ВОДОПОДГОТОВКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕМБРАННЫХ СИСТЕМ УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИИ

П.И. Леонов, И.А. Лушкин

*Тольяттинский государственный университет,
г. Тольятти, Россия*

В статье рассмотрены современные технические решения водоподготовки промышленных предприятий с применением мембранных систем ультрафильтрации. Описаны принципы работы ультрафильтрационных установок, особенности проектирования, эксплуатации и автоматизации систем очистки воды.

Проанализированы преимущества мембранных технологий, их экономическая эффективность и перспективы применения в различных отраслях промышленности.

Ключевые слова: водоподготовка, ультрафильтрация, мембранные технологии, очистка воды, промышленные предприятия, системы фильтрации, водоочистка, автоматизация водоподготовки, промышленная экология.

Современные промышленные предприятия сталкиваются с возрастающими требованиями к качеству воды, используемой в технологических процессах. Ужесточение экологических норм, рост стоимости водных ресурсов и необходимость повышения энергоэффективности производств формируют высокий спрос на современные системы водоподготовки. Одним из наиболее перспективных направлений в данной области является внедрение мембранных технологий, в частности систем ультрафильтрации.

Мембранная ультрафильтрация представляет собой процесс разделения воды и растворённых либо взвешенных веществ через полупроницаемую мембрану с размером пор от 0,01 до 0,1 микрометра.

Одним из важнейших факторов при разработке технических решений ультрафильтрации является проведение комплексного анализа исходной воды. От характеристик воды напрямую зависит выбор технологической схемы, типа мембран и режима эксплуатации оборудования.

При анализе воды определяются следующие показатели: мутность, цветность, содержание железа, содержание марганца, уровень органических загрязнений, бактериологические показатели, жёсткость, минерализация, содержание нефтепродуктов и др.

Для промышленных предприятий источниками воды могут быть:

- поверхностные водоёмы;
- артезианские скважины;
- городские сети водоснабжения;
- оборотные сточные воды.

Каждый источник имеет собственные особенности загрязнений. Например, поверхностные воды содержат большое количество взвешенных веществ и органики, а подземные воды часто характеризуются повышенным содержанием железа и солей жёсткости [1].

После проведения анализа специалисты разрабатывают технологическую схему очистки. В ряде случаев ультрафильтрация используется как самостоятельный этап, однако чаще она интегрируется в многоступенчатую систему водоподготовки. Примеры технологических схем представлены на рисунке 1.

Современные системы водоподготовки промышленных предприятий строятся по модульному принципу. Это позволяет адаптировать оборудование под различные производственные задачи.

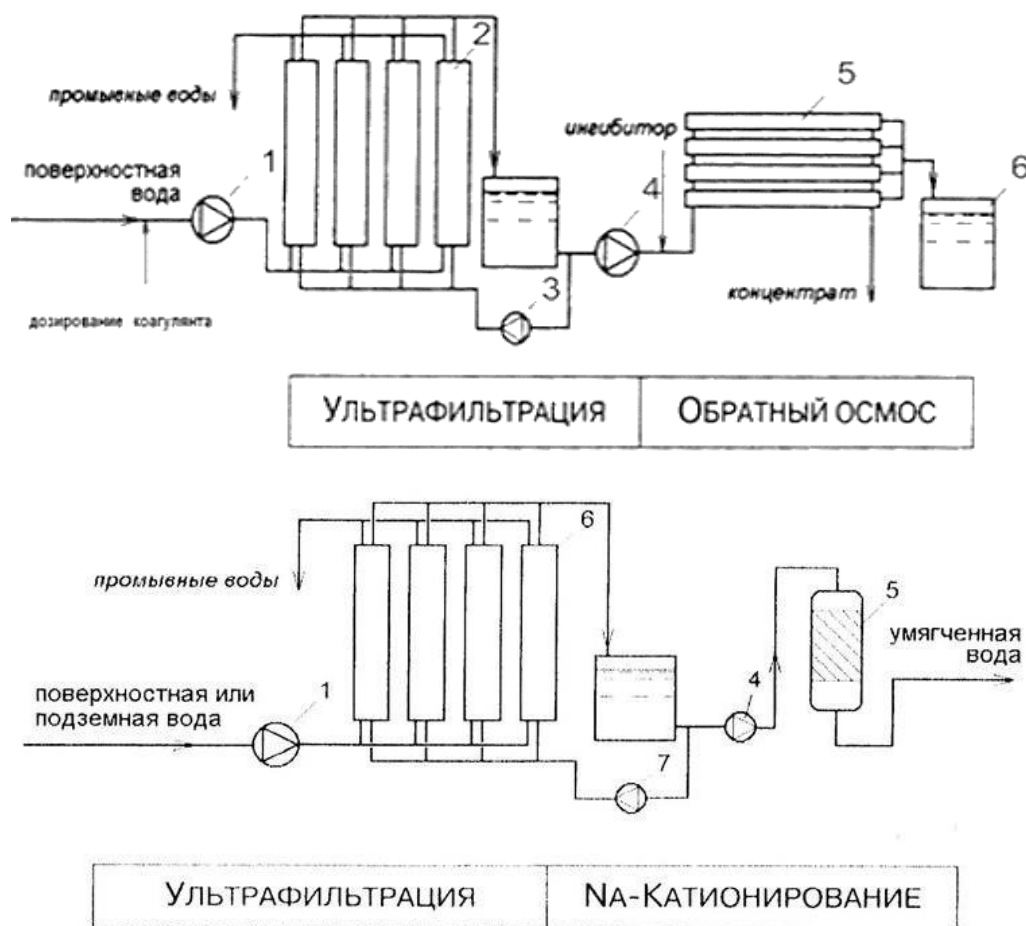


Рисунок 1 – Технологические схемы применения ультрафильтрационных мембран:

а – предочистка перед системами обратного осмоса;

б – предочистка перед Na-катионированием

- 1 – насос подачи на мембранную установку; 2 – ультрафильтрационные аппараты;
 3, 7 – насос обратной промывки; 4 – насос подачи воды на вторую ступень очистки;
 5 – аппараты обратного осмоса или Na-катионитовые фильтры;
 6 – бак очищенной воды [5]

Типовая схема может включать следующие этапы:

1. Предварительная механическая очистка.
2. Коагуляция и флокуляция [2].
3. Осветление воды.
4. Мембранная ультрафильтрация.
5. Обратный осмос (или Na-катионирование).
6. Деионизация.
7. Ультрафиолетовое обеззараживание.

Ультрафильтрационные установки часто используются перед системами обратного осмоса и Na-катионирования. Это позволяет значительно снизить загрязнение обратноосмотических мембран и Na-катионитовых фильтров, а также увеличить срок их эксплуатации [3].

При проектировании ультрафильтрационных установок учитываются [4]:

- гидравлические параметры системы;
- потери давления;
- температурные режимы;
- режимы промывки;
- резервирование оборудования;
- автоматизация процессов;
- интеграция с существующими коммуникациями.

Большое значение имеет выбор компоновки мембранных модулей (вертикальной или горизонтальной).

Современные установки оснащаются автоматизированными системами управления, позволяющими контролировать:

- давление;
- расход воды;
- качество фильтрата;
- степень загрязнения мембран;
- параметры промывки.

Автоматизация повышает надёжность эксплуатации и снижает влияние человеческого фактора.

Внедрение мембранных систем требует значительных первоначальных инвестиций, однако в долгосрочной перспективе такие решения обеспечивают существенную экономию.

Основные преимущества:

- снижение расхода реагентов;
- уменьшение затрат на обслуживание;
- сокращение объёма сточных вод;
- снижение энергопотребления;
- повышение срока службы оборудования;
- уменьшение аварийных простоев.

Экономический эффект достигается также за счёт возможности повторного использования очищенной воды в оборотных циклах предприятия.

Для многих промышленных объектов важным фактором становится соблюдение экологических требований. Мембранные технологии позволяют существенно сократить нагрузку на окружающую среду и снизить объём сбросов загрязняющих веществ.

Мембранные системы ультрафильтрации являются эффективным инструментом для решения задач промышленной водоподготовки.

Список использованных источников

1. Рысин, А.С. Установки очистки подземных вод от железа и марганца на территории г.о. Тольятти и Ставропольского района Самарской Области / А.С. Рысин, И.А. Лушкин, И.С. Алифьев // Города России: проблемы строительства, инженерного обеспечения, благоустройства и экологии: сборник статей XVIII Международной научно-практической конференции, Пенза, 26–27 апреля 2016 года / Международная академия наук экологии и безопасности жизнедеятельности; Академия водохозяйственных наук РФ; Волжское отделение Российской академии ар-

хитектуры и строительных наук; Тольяттинский государственный университет; Межотраслевой научно-информационный центр. – Пенза: Пензенская государственная сельскохозяйственная академия, 2016. – С. 64-70. – EDN WIHTWL.

2. Коагуляционная обработка воды в присутствии диспергированных пузырьков воздуха / К.Л. Чертес, М.А. Сафронов, И.А. Лушкин [и др.] // Водоочистка. – 2015. – № 3. – С. 26-33. – EDN TYYZTD.

3. Первов, А.Г. Использование мембранных технологий в системах водоподготовки энергетических объектов / А.Г. Первов, Е.Б. Юрчевский // Энергосбережение и водоподготовка. – 2005. – № 5(37). – С. 10-14. – EDN JVCRZF.

4. Андрианов, А.П. Исследование и оптимизация работы установок очистки воды методом ультрафильтрации : специальность 05.23.04 "Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов": автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Андрианов Алексей Петрович. – Москва, 2003. – 22 с. – EDN NHKUEP.

5. Первов, А.Г. Современные решения по опреснению морской и подземной воды: сокращение энергозатрат и утилизация концентратов / А.Г. Первов, А.П. Андрианов, В. А. Головесов // Строительство и техногенная безопасность. – 2019. – № 15(67). – С. 169-187. – EDN KCEPIL.

DEVELOPMENT OF TECHNICAL SOLUTIONS FOR WATER TREATMENT OF INDUSTRIAL ENTERPRISES USING MEMBRANE ULTRAFILTRATION SYSTEMS

P.I. Leonov, I.A. Lushkin

Tolyatti State University,
Tolyatti, Russia

The article discusses modern technical solutions for water treatment of industrial enterprises using membrane ultrafiltration systems. The principles of operation of ultrafiltration plants, design, operation and automation features of water purification systems are described. The advantages of membrane technologies, their economic efficiency and prospects of application in various industries are analyzed.

Keywords: water treatment, ultrafiltration, membrane technologies, water purification, industrial enterprises, filtration systems, water treatment, automation of water treatment, industrial ecology.

УДК 004.94:621.311

ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В УПРАВЛЕНИИ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Т.С. Ахметзянов

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

Статья посвящена концепции цифровых двойников (digital twins) в энергетической отрасли и их роли в управлении жизненным циклом энергетического оборудо-

дования. Раскрывается суть термина, даётся определение цифрового двойника и его отличие от смежного понятия «цифровая тень», а также от традиционного имитационного моделирования.

Ключевые слова: цифровой двойник, digital twin, управление жизненным циклом, энергетическое оборудование, имитационное моделирование.

Введение. Концепция цифрового двойника, впервые предложенная Майклом Гривзом, сегодня получила чёткое определение: это реальное отображение всех компонентов в жизненном цикле продукта с использованием физических данных, виртуальных данных и связей между ними. Цифровой двойник включает детальную математическую модель объекта, параметры которой уточняются на основе фактических данных. Наряду с этим термином существует понятие «цифровая тень» – система связей, описывающая поведение реального объекта в нормальных условиях на основе избыточных больших данных. Однако цифровая тень позволяет предсказывать поведение только в уже имеющихся условиях, тогда как цифровой двойник способен моделировать ситуации, в которых объект ранее не эксплуатировался.

Цель статьи – на основе обзора существующих исследований и промышленных примеров раскрыть суть концепции цифрового двойника, показать её принципиальное отличие от имитационного моделирования, а также определить роль этой технологии в управлении жизненным циклом энергетического оборудования, включая необходимые данные и архитектурные уровни.

Основная часть. Современная электроэнергетическая система сталкивается с вызовами, связанными с внедрением возобновляемых источников, распределённой генерации и систем хранения. Это приводит к переменчивому характеру производства и потребления электроэнергии, увеличивая нагрузку на высоковольтное оборудование [1]. Частые отказы являются следствием низкой управляемости и наблюдаемости объектов. Для продления срока службы оборудования на всех этапах жизненного цикла – от формирования технических требований до вывода из эксплуатации – компании внедряют системы мониторинга и диагностики [2].

Традиционное имитационное моделирование, основанное на решении алгебраических и дифференциальных уравнений, исторических данных и экспертных оценках, направлено в первую очередь на оптимизацию этапа проектирования. Оно позволяет описывать поведение системы, формулировать гипотезы и прогнозировать работу, но не обеспечивает обратной связи с реальным объектом в процессе эксплуатации. В отличие от этого, технология цифрового двойника благодаря наличию обратной связи между физическим объектом и моделью позволяет самонастраиваться при изменении состояния системы [3]. После обработки данных на информационном уровне модель пересчитывается, и генерируются рекомендации по оптимизации работы и управлению жизненным циклом оборудования. Цифровой двойник использует текущие данные, ретроспек-

тивную информацию об одном или множестве объектов и обеспечивает физико-математическое моделирование с прогнозированием остаточного ресурса [4].

Таким образом, цифровой двойник становится интеллектуальным программным инструментом, способным предлагать решения для формирования планов технического обслуживания и ремонта, внедрять обслуживание по состоянию (а не просто планово-профилактическое), управлять данными об оборудовании для различных бизнес-процессов, моделировать разработку и производство, снижать риски внедрения инноваций, а также анализировать и прогнозировать техническое состояние на любом этапе жизненного цикла [5]. Ключевое преимущество – возможность перенести необходимые изменения и затраты на этап проектирования, а также использовать технологии виртуальной и дополненной реальности для погружения персонала в среду цифрового двойника [6]. Следует также упомянуть недостатки: высокая сложность и стоимость создания программной части, необходимость мощного аппаратного обеспечения для сбора и передачи больших данных, киберугрозы (вплоть до каскадных аварий при взломе), а также медленный экономический эффект, что может сделать срок окупаемости слишком длительным.

Архитектура цифрового двойника включает физический уровень (объект с датчиками), информационный уровень (проверка соответствия моделей реальным данным, формирование наборов информации, онтологии и стандарты) и прикладной уровень (рекомендации, прогнозный анализ, выявление стратегий развития) [7]. Информационный уровень использует облачные технологии и граничные вычисления для синхронизации в реальном времени. Прикладной уровень опирается на алгоритмы машинного обучения (с учителем, без учителя, с подкреплением) для обнаружения аномалий и дефектов. Интернет вещей агрегирует и предварительно обрабатывает данные из разнородных источников.

Что касается данных, то они являются основой технологии. Для электрической сети необходимы: база данных цифрового двойника, техническая информация (настройки релейной защиты, токонесущая способность, перечень оборудования, остаточный срок службы), внешние данные (обслуживание и ремонт, стратегии развития, географические и метеорологические данные, данные о потреблении) [8]. Для газовых турбин требуются данные о внешних условиях (температура, влажность, нагрузка), технические характеристики оборудования и параметры топливной смеси. Для ветротурбин – паспортные данные, текущие и исторические параметры работы, метеоданные. Для подстанций и линий электропередачи применяются системы IoT с интеллектуальными датчиками, RFID-метками и 3D-моделями. Для хранения и обработки данных используются реляционные базы данных (Oracle, SQL), облачные хранилища, системы типа Predix от General Electric, а также протоколы OPC UA и Modbus.

Промышленные примеры подтверждают эффективность. Siemens разработала цифровой двойник SiprotecDigitalTwin для защитного устройства

Siprotec 5, что позволило сократить время аварийных простоев. General Electric на платформе PREDIX создала двойник газовых турбин с интеллектуальной базой данных и аналитическим блоком для прогнозирования производительности [9]. Российская система «Прана» от АО «Ротек» использует многомерную модель состояния оборудования на основе нейронных сетей и больших данных. ВНИИАЭС создал виртуальную цифровую атомную электростанцию, позволяющую рассчитывать поведение нового оборудования до его установки. Финская компания Fingrid Oyj разработала систему ELVIS для управления активами магистральной сети в реальном времени [10].

Заключение. Таким образом, цифровые двойники решают ключевую проблему интеграции физических объектов с интеллектуальными системами. В отличие от имитационного моделирования, они работают на всех этапах жизненного цикла энергооборудования, анализируя переходы между ними и оптимизируя управление ресурсом. Даже простая цифровая копия ускоряет сбор больших данных – основы для будущих интеллектуальных систем. Это позволяет внедрить онлайн-мониторинг, диагностику и обслуживание по состоянию, снижая эксплуатационные расходы. Несмотря на высокую стоимость и сложность, технология стимулирует цифровую трансформацию отрасли и открывает новые возможности для развития предприятий.

Список использованных источников

1. Gataullin A.M. Insulators electrical strength estimation under ac applied voltage. В сборнике: Proceedings - 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2019. 2019. – С. 35-39.
2. Tao, F.; Sui, F.; Liu, A.; Qi, C.; Zhang, M.; Song, B.; Lu, S.; Ni, A. The concept of product design based on a digital twin. Int. J. Prod. Res. 2018, 57, 3935-3953.
3. Brandtstaedter, H.; Ludwig, K.; Hübner, L.; Zuchnik, E.; Yungevich, A.; Wever, U. Digital doubles for large electric power plants. In Proceedings of the European Petroleum and Chemical Industry Conference (PCIC Europe), Antwerp, Belgium, June 5-7, 2018.
4. Gataullin A.M., Gubaev D.F., Khusnutdinov R.R. Automation of high-voltage electrical equipment insulators diagnostics by partial discharges method. В сборнике: Proceedings - 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021. 2021. С. 58-62.
5. Ganzha, S.; Aminov, D.; Kysh, I.; Kosimov, B. Application of digital twin technology for analysis of brushless electric machines with axial magnetic flux. In Proceedings of the Global Conference on Intellectual Industry (GloSIC), Chelyabinsk, Russia, November 13-15, 2018.
6. Gataullin A.M., Gubaev D.F., Gataullina R.V. Software and hardware system of monitoring high-voltage electric equipment based on the analysis of partial discharge characteristics. В сборнике: International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Proceedings. 2023. С. 171-176.
7. Jain, P.; Poon, J.; Singh, J. P.; Spanos, K.; Sanders, S.; Panda, S. K. A digital twin approach for fault diagnosis in a distributed photovoltaic system. IEEE Trans. Power Electron. 2020 , 35 , 940–956.

8. Gataullin A.M. Online monitoring of the porcelain insulator units state. В сборнике: 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020. 2020. С. 9271631.

9. Greaves, M.V. Digital Twin: Improving Production through Virtual Factory Copying; Florida Institute of Technology: Melbourne, Florida, USA, 2014.

10. Gataullin A.M. Online technology of insulators condition monitoring in smart grid power supply systems. В сборнике: 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019. 2019. С. 8934770.

AN OVERVIEW OF THE APPLICATION OF DIGITAL TWIN TECHNOLOGY IN LIFE CYCLE MANAGEMENT OF ELECTRICAL EQUIPMENT

T.S. Akhmetzyanov

*Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia*

The article is devoted to the concept of digital twins in the energy industry and their role in managing the lifecycle of energy equipment. The essence of the term is revealed, the definition of a digital twin is given and its difference from the related concept of "digital shadow", as well as from traditional simulation modeling.

Keywords: *digital twin, digital twin, lifecycle management, energy equipment, simulation modeling.*

СОДЕРЖАНИЕ

ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 0,4-6 (10) КВ М.М. Агазуллин, О.Е. Куракина	3
РАЗРАБОТКА НОВОЙ СТРУКТУРЫ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ 6 КВ М.М. Агазуллин, О.Е. Куракина	6
ПРИМЕНЕНИЕ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ В ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ: АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР Т.С. Ахметзянов	11
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ВИЗУАЛЬНОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ В СБОРОЧНЫХ ОПЕРАЦИЯХ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ Б.Р. Бакланов, И.В. Воробьев, М.А. Монахов.....	14
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РОБОТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ ЭЛЕКТРОНИКИ Б.Р. Бакланов, И.В. Воробьев, М.А. Монахов.....	20
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ НА ЭТАПЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КОРРЕКТИРОВКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ Б.Р. Бакланов, И.В. Воробьев, М.А. Монахов.....	24
ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ АНАЛИТИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ НАВИГАТОР ВІ В СФЕРЕ УПРАВЛЕНИЯ ФИНАНСАМИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ М. Барабаш, Е. Казанцева, В. Сычиков, Д. Федорина	29
СОСТОЯНИЕ ОСНОВНЫХ ФОНДОВ ЭНЕРГЕТИКИ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН 2024-2025 Е.В. Баскакова, Р.А. Бурганов	38
РАЗРАБОТКА ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА СЕРДЕЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ОСНОВЕ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ А.Р. Бахтевалиев, К.Х. Гильфанов	41
РАЗРАБОТКА ВЕБ-СЕРВИСА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ОРГАНИЗАЦИИ ГРУЗОВЫХ И ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК К.А. Белякова	45
ВЛИЯНИЕ ЦИФРОВИЗАЦИИ НА ГЕНЕРАЦИЮ И УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ А.И. Биктимеров, А.М. Маклецов.....	47
МЕТОДИКИ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ПРОТОТИПОВ А.В. Бобровский, Е.Д. Власова, Н.И. Бажутин	50
АВТОМАТИЗАЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ АССОРТИМЕНТА РОЗНИЧНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ В УСЛОВИЯХ СТОХАСТИЧЕСКОГО СПРОСА НА ОСНОВЕ ГИБРИДНОГО АЛГОРИТМА GO-PSO Д.М. Большаков	54
ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ КАЛЕНДАРНО-СЕТЕВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ В ПРОВЕДЕНИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ НИОКР В.В. Борисова	60
СОВРЕМЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ, МОНТАЖ И ДИАГНОСТИКА КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ 6–500 КВ И.М. Валеев, А.Х. Сабитов	65
ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОБСТВЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ ДЛЯ МАЛОГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА ПРИМЕРЕ ГАЗОПОРШНЕВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ И.М. Валеев, М.Ш. Гарифуллин	68
СТАНДАРТИЗАЦИЯ РАЗРАБОТКИ И ТРЕБОВАНИЙ ПРОГРАММНЫХ СИСТЕМ О.А. Варыгина.....	71
ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СТАНДАРТИЗАЦИИ В СИСТЕМЕ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ О.А. Варыгина.....	74

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ ПУТЁМ ОПТИМИЗАЦИИ ФОРМЫ ПАЗОВ	77
Д.А. Волосюк, Д.В. Шутова	
СИНТЕЗ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ И РУЧНЫХ МЕТОДОВ В СОВРЕМЕННОЙ ХУДОЖЕСТВЕННОЙ ОБРАБОТКЕ КАМНЯ: ОТТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ К ЭСТЕТИЧЕСКОЙ ВЫРАЗИТЕЛЬНОСТИ	81
Н.А. Выдрина	
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ, РЕСУРСНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ХУДОЖЕСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ КАМНЯ	85
Н.А. Выдрина	
УПРАВЛЕНИЕ НАДЁЖНОСТЬЮ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ КАК ФАКТОР СНИЖЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТРАВМАТИЗМА	90
А.И. Газизова, Р.Н. Пигилова	
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ РУЧНОЙ И АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ В АВТОМОБИЛЕСТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ	94
Б.И. Гильфанов, Р.И. Давлетшин	
ОБЗОР МЕХАНИЗМОВ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ МУФТ КАБЕЛЕЙ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ	97
А.Р. Гиниятов	
СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ: ДОСТИЖЕНИЯ И НАПРАВЛЕНИЯ НА БУДУЩЕЕ	101
А.Р. Гиниятов	
ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ И ЛОКАЛИЗАЦИИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ	104
Д.А. Горбачев	
ИНТЕГРАЦИЯ МОБИЛЬНЫХ ПОДСТАНЦИЙ В КОНЦЕПЦИЮ ACTIVE DISTRIBUTION NETWORK (ADN) С ДИНАМИЧЕСКОЙ АДАПТАЦИЕЙ ТОЧКИ ПРИСОЕДИНЕНИЯ	109
Р.З. Давлетбаев	
ОСОБЕННОСТИ ПРИСОЕДИНЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ ПОДСТАНЦИЙ	112
Р.З. Давлетбаев	
СИНХРОНИЗАЦИЯ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ СИНФАЗНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ (POINT-ON-WAVE) ДЛЯ БЕЗУДАРНОГО ПОДКЛЮЧЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ ПОДСТАНЦИЙ	116
Р.З. Давлетбаев	
АВТОМАТИЗАЦИЯ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА	120
Е.Е. Дробышева, Н.А. Зенков, А.А. Кузьмина, Л.А. Сазанова	
ШАМОТ КАК ОТОЩАЮЩИЙ МАТЕРИАЛ В КЕРАМИКЕ	123
А.А. Дружинина	
ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР В ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ТРАВМАТИЗМЕ: АНАЛИЗ ПРИЧИН ОШИБОК МОЛОДЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ НА СТАРТЕ КАРЬЕРЫ	127
С.А. Егорова, Р.Ф. Закирова	
ВЫЗОВЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ	130
И.И. Едиханов	
СТРАТЕГИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНЫХ ВЫЗОВОВ	134
И.И. Едиханов, О.Е. Куракина	
ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ОБЛАСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ И ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОВРЕЖДЕНИЙ КАБЕЛЕЙ	137
М.Д. Елфутин, Д.А. Каюмова	
ТЕНДЕНЦИИ ПЕРЕХОДА К МАШИННОМУ ОБУЧЕНИЮ В ОБЛАСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ И ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОВРЕЖДЕНИЙ КАБЕЛЕЙ	147
М.Д. Елфутин, И.И. Зиннатуллин	
РАЗРАБОТКА ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ УЧЁТА РЕЗУЛЬТАТОВ КОНТРОЛЯ В ЛАБОРАТОРИИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ	154
И.С. Ермилова, А.С. Юсупова	

УПРАВЛЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ	
К.А. Ермохина, Р.Н. Пигилова	158
ОЦЕНКА ОСВЕЩЁННОСТИ УЧЕБНЫХ АУДИТОРИЙ И ЕЁ ВЛИЯНИЕ НА БЕЗОПАСНОСТЬ	
Ч.И. Зарипова, Р.Н. Пигилова.....	161
ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ УПРАВЛЯЮЩЕЙ ПРОГРАММЫ НА КАЧЕСТВО ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ	
В.В. Зиновьев, Ю.В. Истомина.....	164
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ФТОРОПЛАСТОВЫХ ПОКРЫТИЙ С УНТ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ВОДОРОДОБАРЬЕРНЫХ СВОЙСТВ	
В.А. Злотин, А.П. Петкова	167
СОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ: ПРИНЦИПЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ	
А.А. Идиятуллин, М.Ш. Гарифуллин	171
ЦИФРОВИЗАЦИЯ ПОДСТАНЦИЙ: РОЛЬ ЦИФРОВЫХ ЩИТОВЫХ ПРИБОРОВ В ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИСПЕТЧЕРСКОГО УПРАВЛЕНИЯ	
А.А. Идиятуллин, М.Ш. Гарифуллин	174
НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИНТЕГРАЦИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ	
В.Э. Имгрунт, Ю.В. Лузгина	177
ВЛИЯНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ ПРОДУКЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ	
Э.М. Каан.....	181
К ПРОБЛЕМЕ ИЗУЧЕНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ШУМА НА РАБОТНИКОВ И ЕГО НОРМИРОВАНИЯ НА РАБОЧИХ МЕСТАХ	
В.Д. Катин, А.А. Журавлев	184
СТАНОВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ЦИКЛА	
А.Б. Квасюк	188
МОДИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА XGBOOST ДЛЯ УЧЕТА НЕСТАЦИОНАРНОСТИ ДАННЫХ В ЗАДАЧАХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РИСКОВ ИТ-ПРОЕКТОВ	
А.А. Кечкина, В.Н. Богатилов, С.А. Ситников	191
NOSQL КАК ИНСТРУМЕНТ ГИБКОСТИ: АНАЛИЗ ДОКУМЕНТО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СУБД (MONGODB) ДЛЯ ЗАДАЧ УЧЕТА	
П.С. Ковтан.....	195
МЕТОДЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ПРИ МОДЕРНИЗАЦИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ	
А.Д. Колосов.....	200
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ КОНИЧЕСКИХ ФРИКЦИОННЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ОСЕВОЙ НАГРУЗКИ	
Д.В. Кочетков, А.М. Пучков, Д.Ю. Демидов	204
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНИЧЕСКИХ ФРИКЦИОННЫХ СОЕДИНЕНИЙ	
Д.В. Кочетков, Д.Ю. Демидов, А.М. Пучков	208
ОСОБЕННОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТРОСОВОЙ ПРОВОДКИ УПРАВЛЕНИЯ ВЕРТОЛЕТА В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ	
К.А. Курбанов, Н.В. Рогов	212
СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА	
Д.О. Лебедев, С.С. Ус, Е.Е. Кузнецов	216
ВНЕДРЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ: ОСНОВНЫЕ РИСКИ	
М.В. Логунова, М. К. Измаилов	220
КРЕПЕЖНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ В СОВРЕМЕННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ	
А.Н. Лошаев	233

МОДЕЛЬ СЕГМЕНТАЦИИ И ИЗОЛЯЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СЕТИ КАК ЭЛЕМЕНТ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ	
А.А. Лукоянов	236
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКОМ ЦЕННОСТИ В ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ	
В.Л. Лучинкин.....	241
КОНЦЕПЦИЯ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА КАК ИНСТРУМЕНТ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА	
С.А. Мампория	246
ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПЕРСОНАЛЬНЫХ ДАННЫХ В ТРАНСПОРТНЫХ И СОЦИАЛЬНЫХ ЦИФРОВЫХ СЕРВИСАХ	
В.Р. Масалимова, Е.Ю. Царегородцева, И.П. Насонов, Аксёнова В.М.	250
СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ГИДРОФОБИЗАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ДИСПЕРСНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ	
А.А. Масленников.....	253
ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ ТЕХНИКИ НА ГИБРИДНОЙ ТЯГЕ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛЕСА: ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ И ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ	
В.В. Махнушко, Д.О. Чернышев, А.И. Шкаленко.....	257
ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОВЕРХНОСТНОГО МОНТАЖА ПЕЧАТНОГО УЗЛА	
П.А. Мельник	263
КРАТКИЙ ОБЗОР СТЕРНЕВЫХ СЕЯЛОК И ИХ СОШНИКОВ	
Н.С. Минеев, П.Н. Хорев, М.А. Терехин.....	267
ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ЭКИПАЖА	
А.О. Мохов	273
РАЗНООБРАЗИЕ КОНСТРУКЦИЙ КРЫЛЬЕВ В АВИАЦИИ	
А.О. Мохов	276
СПОСОБЫ УСКОРЕННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КРЫЛЬЕВ ДЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ САМОЛЕТОВ	
А.О. Мохов	281
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА НОРМ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА НЕФТИ С УЧЕТОМ РЕЖИМНЫХ И МЕТЕОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ	
М.Э. Музафаров, Л.А. Рябишина	284
МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ	
Р.Р. Мустафин	288
ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ОБНАРУЖЕНИИ И ЛОКАЛИЗАЦИИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ КАБЕЛЕЙ	
Р.Р. Мустафин	293
ВЛИЯНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА УРОВЕНЬ ТРАВМАТИЗМА И МЕТОДЫ ЕЕ СНИЖЕНИЯ	
З.Р. Мустафина, Р.Н. Пигилова	296
РАССМОТРЕНИЕ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЙ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ	
Б.Н. Мухтаров, Д.М. Валиуллина	301
ОБЗОР СЕНСОРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ	
Э.А. Нуртдинова	304
СЕНСОРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ	
Э.А. Нуртдинова	308

ПОВЫШЕНИЕ ПОСЛЕРЕМОНТНОГО РЕСУРСА ГИЛЬЗ ЦИЛИНДРОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ МЕТОДОМ ФИНИШНОЙ АНТИФРИКЦИОННОЙ БЕЗАБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ	
И.Ю. Осипов, А.А. Орехов	311
СЕБЕСТОИМОСТЬ В ДОБЫВАЮЩИХ И ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ОТРАСЛЯХ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДРАЙВЕРОВ ЗАТРАТ И СТРАТЕГИИ ИХ СНИЖЕНИЯ	
Л.А. Отставнова, С.А. Сукасян.....	316
АРХИТЕКТУРА ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ И ПРОТОКОЛА BDSR	
А.А. Пономарев, Е.О. Корабельников, Д.С. Соловьев, А.В. Самохвалов.....	322
МЕТОД СИСТЕМНОЙ ДИАГНОСТИКИ И РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ТЕСТИРОВАНИЯ МИКРОКОНТРОЛЛЕРНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ПРОТОКОЛА BDSR	
А.А. Пономарев, Е.О. Корабельников, Д.С. Соловьев, А.В. Самохвалов.....	326
ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ СЕВЕРА	
В.М. Распопин, Е.О. Мартко.....	331
ПОЛУЧЕНИЕ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ ИЗ РАЗНОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНЫМ НАГРУЖЕНИЕМ	
Ж.В. Самохвалова	334
ПРОБЛЕМЫ ПРИ ОБЖАТИИ ТРУБ МАЛОГО ДИАМЕТРА ДАВЛЕНИЕМ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ	
Ж.В. Самохвалова	339
МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ	
С.В. Сарафанов, В.В. Максимов.....	344
АВТОМАТИЗАЦИЯ ВЕРИФИКАЦИИ ОБНОВЛЕНИЙ ПРОГРАММНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ В DEVSECON-КОНВЕЙЕРЕ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ	
Е.Н. Секретарева, А.А. Бесчастнов	348
АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	
Н.А. Сергеев, С.Е. Воропаев.....	353
КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ ПРОДУКЦИИ	
Н.А. Сергеев, С.Е. Воропаев.....	356
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ КАК ИНСТРУМЕНТ СНИЖЕНИЯ ИЗДЕЖЕК НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ	
Н.А. Сергеев, С.Е. Воропаев.....	360
УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ КОНТРОЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ	
Н.А. Сергеев, С.Е. Воропаев.....	363
ЦИФРОВИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ПРЕДПРИЯТИЯ	
Н.А. Сергеев, С.Е. Воропаев.....	367
АЛГОРИТМЫ ТРАССИРОВКИ ЗНАНИЙ И ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ ЗАДАЧ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ	
А.К. Сиукаева, А.В. Матыцин, Л.В. Гаев	370
РАЗРАБОТКА ПЛАНЕТАРНОГО МЕХАНИЗМА ПЕРЕНОСНОГО СТАНКА ДЛЯ АБРАЗИВНОЙ ДОВОДКИ ПРИ ЕГО МОДЕРНИЗАЦИИ	
В.А. Скрыбин, С.А. Гусев.....	373
АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АНАЛИЗ ИНВЕСТИЦИОННОГО ПРОЕКТА С ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ-ФОРМУЛЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАФОАНАЛИЗАТОРА	
А.Ю. Соколова, Д.А. Попова, В.А. Рязанцева	377
ОБОСНОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ТУКОВЫХ СОШНИКОВ ПРОПАШНЫХ СЕЯЛОК	
М.А. Терёхин, А.Н. Калабушев, А.В. Яшин, Ю.А. Епланов	381

ОБЗОР МЕТОДОВ НЕЙРОСЕТЕВОЙ 3D-РЕКОНСТРУКЦИИ НА ОСНОВЕ NERF И 3D GAUSSIAN SPLATTING В СОВРЕМЕННОЙ ФОТОГРАММЕТРИИ К.А. Тимаков	387
ВНЕДРЕНИЕ ПРИНЦИПОВ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА В СФЕРУ РАЗМЕЩЕНИЯ НАРУЖНОЙ РЕКЛАМНОЙ ПРОДУКЦИИ А.А. Тришин, М.Р. Тихонов	391
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРЕННЕГО ШЛИФОВАНИЯ С ПРОДОЛЬНОЙ ПОДАЧЕЙ Н.Ф. Тихонов	396
ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВНУТРЕННЕГО ШЛИФОВАНИЯ С ПРОДОЛЬНОЙ ПОДАЧЕЙ Н.Ф. Тихонов	401
БИОРАЗЛАГАЕМЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИЛАКТИДА: ЗАРУБЕЖНЫЙ И ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ОПЫТ С.К. Фишкина, М.А. Дёгтева	406
БАЗОВАЯ МОДЕЛЬ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА А.А. Хазиева, Р.Н. Пигилова	408
ОСНОВНЫЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ЦЕМЕНТИРОВАНИЯ СКВАЖИН Д.А. Хасанов	412
ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ Е.Ю. Царегородцева, В.Р. Масалимова, И.П. Насонов, В.М. Аксёнова	416
СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ИНТЕГРАЦИИ FASTAPI, MYSQL И SCIKIT-LEARN В ЗАДАЧАХ АНАЛИЗА ПОВЕДЕНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ Н.В. Чувило	419
ШУМ КАК ВРЕДНЫЙ ФАКТОР ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СРЕДЫ: ИСТОЧНИКИ И МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ РИСКОВ В.Р. Шарипова, Р.Н. Пигилова	422
МОДУЛЬНАЯ СИСТЕМА УДАЛЁННОГО МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ НА ПРОЦЕССОРЕ ESP32 С ВЕБ-ИНТЕРФЕЙСОМ И ЛОКАЛЬНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ И.В. Шибитов	425
ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В СИСТЕМАХ ВОССТАНОВЛЕНИЯ МОСТОВ И ПУТЕПРОВОДОВ П.Д. Широкова	430
ЛАЗЕРНОЕ СКАНИРОВАНИЕ ВЫСОТНЫХ ОБЪЕКТОВ В СИСТЕМЕ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В.А. Щапов	433
КОРРОЗИЯ АРМАТУРНОЙ СТАЛИ КАК ФАКТОР СНИЖЕНИЯ ОГНЕСТОЙКОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В.А. Щапов	437
КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ПОЖАРНЫХ РИСКОВ НА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТАХ В.А. Щапов	440
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПРИЁМОПЕРЕДАТОЧНОГО УСТРОЙСТВА СТАНКА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АРМИРОВАННОЙ КОЛЮЧЕЙ ЛЕНТЫ М.А. Юдин, А.Е. Шаралапов	444
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЯ И ДЕМАНГАНАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИ НАЛИЧИИ В НИХ ЦВЕТНОСТИ И МУТНОСТИ И.С. Алифьев, И.А. Лушкин, Д.А. Борисов	447
ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ КОМБИНИРОВАННОЙ СХЕМЫ ОЧИСТКИ ГОРОДСКОГО ЛИВНЕВОГО СТОКА В.О. Дегтярев	452
РАЗРАБОТКА СООРУЖЕНИЙ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОЧИСТКИ ВОДЫ ИЗ ИСТОЧНИКОВ С ОБИЛЬНОЙ ВОДНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ Н.С. Зюрин	456

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВОДОПОДГОТОВКИ КОТЕЛЬНОЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ	
М.Д. Кузьмин	463
РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ВОДОПОДГОТОВКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕМБРАННЫХ СИСТЕМ УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИИ	
П.И. Леонов, И.А. Лушкин	466
ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В УПРАВЛЕНИИ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ	
Т.С. Ахметзянов	470

Научное издание

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ СОВРЕМЕННЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Статьи публикуются в авторской редакции

Ответственный за выпуск –
начальник Межотраслевого научно-информационного центра
Е.А. Галиуллина
Компьютерная верстка – **Л.Р. Дмитриенко**

Дата подписания к публикации 18.05.2026

Учетно-издательские листы 29,53

Межотраслевой научно-информационный центр Пензенского государственного аграрного университета. 440014, г. Пенза, ул. Ботаническая, 30,
<https://mnis.pgau.ru>; mnis@pgau.ru; телефоны редакции:
тел.-факс. (841-2) 62-90-60, +7 967 442-60-42

ISBN 978-5-00196-436-0



9 785001 964360 >