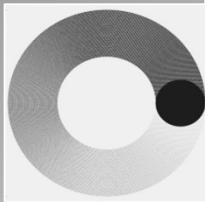


2025
(9)



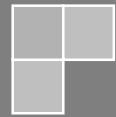
ВЕСТНИК ПОЛИТЕХА

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**Рязанский институт (филиал) Московского
политехнического университета**



Россия
Рязань
22.12.2025



ВЕСТНИК ПОЛИТЕХА

Научно-практический журнал

"ВЕСТНИК ПОЛИТЕХА" – научно-практический журнал, целями которого являются формирование открытого информационного пространства для широкого обмена научной информацией по обозначенным в журнале направлениям между высшими учебными заведениями и научными учреждениями; привлечение внимания к наиболее актуальным, перспективным и интересным направлениям современной науки и практики.

В журнале публикуются материалы исследований, научные статьи и обзоры, посвященные фундаментальным и прикладным проблемам по общественным, техническим, естественным наукам.

Основные тематики журнала

- оборудование, технологии, приборы и инструменты;
- экономика, менеджмент и управление, маркетинг;
- информационное обеспечение, технические науки;
- строительство и архитектура;
- естественные науки.

Основан в 2018 году. Выходит раз в год

Учредитель:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет»

Зарегистрирован Управлением Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций по Рязанской области

Реестровая запись СМИ от 11.01. 2018 г.

Серия ПИ № ТУ62-00288

ISSN 2618-687X

Размещается в электронной библиотеке eLIBRARY.RU

Главный редактор
д-р полит. наук, профессор В.С. Емец
Заместитель главного редактора
канд. техн. наук, доцент А.С. Асаев

Редакционная коллегия
канд. техн. наук, А.Н. Паршин
канд. техн. наук, доцент Н.А. Антоненко
канд. техн. наук, А.В. Байдов
канд. ист. наук, доцент Е.Н. Костылева
канд. архитектуры Н.А. Осина
канд. техн. наук, доцент В.Н. Ретюнских
канд. экон. наук, доцент С.В. Фролова
И.А. Юдаев
И.Л. Боровикова

Научные редакторы:
д-р техн. наук, профессор И.Е. Кущев
д-р пед. наук Н.В. Герова
д-р техн. наук, профессор Ю.А. Юдаев

Адрес редакции:
390000, Рязань, ул. Право-Лыбедская, 26/53, ауд. 231
Тел. +7 (4912) 28-39-67 e-mail: vestnik-rimsou@mail.ru

Периодическое научное издание
Вестник Политеха. 2025. № 9
Научно-практический журнал

Подписано в печать 16.12.2025
Дата выхода в свет 22.12.2025
Формат А4.

Бумага офсетная. Печать офсетная.
Тираж 24 экз. Заказ № 35 «Свободная цена»
Рязанский институт (филиал) Федерального
государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Московский политехнический
университет»
Отпечатано в типографии Рязанского института (филиала)
Московского политехнического университета

Адрес издателя, типографии:
390000, Рязань, ул. Право-Лыбедская, 26/53

© Рязанский институт (филиал) Московского
политехнического университета, 2025

12 +

АВТОРЫ ОПУБЛИКОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ НЕСУТ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ ЗА ТОЧНОСТЬ ПРИВЕДЕНИХ ФАКТОВ, ЦИТАТ, СОБСТВЕННЫХ ИМЕН И ПРОЧИХ СВЕДЕНИЙ. РЕДАКЦИЯ МОЖЕТ ОПУБЛИКОВАТЬ СТАТЬИ, НЕ РАЗДЕЛЯЮЩИЕ ТОЧКУ ЗРЕНИЯ АВТОРА. ЗА СОДЕРЖАНИЕ РЕКЛАМНЫХ ОБЪЯВЛЕНИЙ РЕДАКЦИЯ ОТВЕТСТВЕННОСТИ НЕ НЕСЕТ. ПЕРЕПЕЧАТКА ИЛИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ НОМЕРА ЛЮБЫМ СПОСОБОМ ПОЛНОСТЬЮ ИЛИ ПО ЧАСТИЯМ ДОПУСКАЕТСЯ ТОЛЬКО С ПИСЬМЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ИЗДАТЕЛЯ

СОДЕРЖАНИЕ

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИННОВАЦИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Елманов П.С., Чернышев А.Д., Мартынов Е.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ВЫГЛАЖИВАНИЕМ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ ТИПА «ОСЬ»..... 3

Каримбоев А., Татарников Н.Н.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ «КОРПУС» С ИССЛЕДОВАНИЕМ ВЛИЯНИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА НА ШЕРОХОВАТОСТЬ И ВОЗНИКНОВЕНИЕ АВТОКОЛЕБАНИЙ..... 5

Кобытляева Я.Е., Маникина Д.А., Аверин Н.В.

3D-ПЕЧАТЬ КАК АКТУАЛЬНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ..... 8

Кузнецова А.Р., Аверин Н.В.

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКЕ..... 12

Лебедев С.П.

ИОННО-ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА ИНСТРУМЕНТА ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ Р6М5... 14

Татарников Н.Н., Гришакина И.В.

КЛЮЧЕВЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ОСОБЕННОСТИ ВНЕДРЕНИЯ САПР В РАМКАХ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ..... 21

Чевакин И.Ю., Зинакова С.Э.

КОНЦЕПЦИЯ АВТОНОМНОГО ЗАВОДА В РОССИЙСКОМ МАШИНОСТРОЕНИИ: ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ, ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ..... 26

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Кирьяков О.В., Токарев А.О., Юдаев Ю.А., Кирьяков А.О.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ..... 31

Кирьяков О.В., Юдаев Ю.А., Кирьяков А.О., Токарев А.О.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СТРЕССА ДИСПЕТЧЕРА ЦУС..... 34

Официн С.И., Калюков А.А., Гришанов Р.А.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КЛАССИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ ДЛЯ МОНТАЖА ЭЛЕКТРОННОГО УСТРОЙСТВА..... 39

Романова Ю.А., Кирьяков О.В.

ОРГАНИЗАЦИЯ ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ РФ..... 43

Шуктомов К.Б., Кирьяков О.В.

МЕТОДЫ АНАЛИЗА ПРОФИЛЕЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОГО ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ..... 49

НОВЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ КОЛЕСНОЙ И ГУСЕНИЧНОЙ ТЕХНИКИ

Котов А.А., Ретюнских В.Н., Титлов А.В.

ДОРАБОТКА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ ОПАСНЫХ ГРУЗОВ..... 53

Метик В.В., Котов А.А., Титлов А.В.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАЩИТЫ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ..... 58

Ретюнских В.Н., Метик В.В., Титлов А.В.

РАЗРАБОТКА МЕХАНИЗМА ПОДЪЁМНО-СДВИЖНОЙ ПЕРЕГОРОДКИ ДЛЯ ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ФУРГОНОВ..... 63

Титлов А.В., Ретюнских В.Н., Метик В.В.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТКИ 3D МОДЕЛЕЙ ДЕТАЛЕЙ И СБОРОК ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ..... 67

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ИНЖЕНЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

Официн С.И., Гуреев М.М., Костиков Д.А.

КЛЮЧЕВЫЕ АСПЕКТЫ ИНЖЕНЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ В РЯЗАНСКОЙ ОБЛАСТИ..... 72

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИННОВАЦИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 621.923.4

Елманов Павел Сергеевич, магистрант кафедры «Машиностроение, энергетика и автомобильный транспорт» РИ(ф)МПУ,
g0dn0n0net@gmail.com

Чернышев Алексей Дмитриевич, канд. техн. наук, и.о. заведующего кафедрой «Машиностроение, энергетика и автомобильный транспорт» РИ(ф)МПУ, aa777aab2@yandex.ru, SPIN 5899-2853

Мартынов Евгений Владимирович, магистрант кафедры «Машиностроение, энергетика и автомобильный транспорт» РИ(ф)МПУ, aa777aab2@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ВЫГЛАЖИВАНИЕМ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ ТИПА «ОСЬ»

Аннотация: в статье проведено исследование метода отделочно-упрочняющей обработки выглаживанием для повышения эксплуатационных характеристик деталей типа "Ось". Рассмотрены основные принципы метода, параметры обработки и особенности применяемого оборудования. Получены результаты, свидетельствующие о значительном снижении шероховатости поверхности, увеличении микротвердости и глубины упрочненного слоя, а также формировании остаточных напряжений сжатия, что приводит к повышению износостойкости и усталостной прочности деталей. Данный метод показан как эффективный способ улучшения долговечности осевых деталей в машиностроении.

Ключевые слова: отделочно-упрочняющая обработка, выглаживание, ось, эксплуатационные характеристики, микротвердость, шероховатость, усталостная прочность.

В современном машиностроении повышенные требования к надежности и долговечности оборудования диктуют необходимость применения методов поверхностного упрочнения деталей. Ось, как один из основных элементов передачи движения и нагрузки, требует улучшения эксплуатационных характеристик, таких как износостойкость и усталостная прочность. Отделочно-

упрочняющая обработка выглаживанием представляет собой эффективный способ поверхностного пластического деформирования с целью улучшения микроструктуры, снижения шероховатости и создания остаточных напряжений сжатия на поверхности детали, что способствует значительному увеличению ее срока службы [1,2].

В исследовании применялись цилиндрические оси из высокопрочных сталей, предварительно подготовленные токарной обработкой с контрольной шероховатостью не выше R_a 0,8 мкм. Для выглаживания использовались выглаживатели цилиндрической формы, оптимальные для обработки наружных цилиндрических поверхностей (рисунок 1) [3]. Метод жестко-упругого выглаживания включал деформирование двумя инденторными элементами: первый с жестким закреплением для создания пластической деформации, второй – упругий для сглаживания шероховатости (рисунок 2). Основные режимы процесса: натяг 50–150 мкм, усилие поджима 40–120 Н, скорость до 70 м/мин, подача не более 0,13 мм/об. Такой режим оптимален для получения максимальной глубины упрочненного слоя и лучшего качества поверхности [4]. При этом основные параметры при выглаживании цилиндрической поверхности представлены таблице 1.

В результате обработки шероховатость поверхности снизилась до R_a 0,02–0,1 мкм, что свидетельствует о высоком качестве отделочной обработки.



Рисунок 1 – Схема процесса выглаживания цилиндрической оси

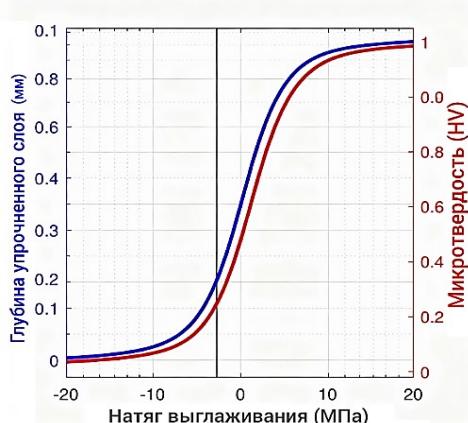


Рисунок 2 – График зависимости глубины упрочненного слоя и микротвердости от натяга выглаживания

Таблица 1 – Основные параметры режима выглаживания

Параметр	Диапазон значений	Единицы
Натяг	50 – 150	мкм
Усилие поджима	40 – 120	Н
Скорость обработки	до 70	м/мин
Подача	$\leq 0,13$	мм/об

Возможность комбинированного применения выглаживания с другими методами упрочнения, такими как лазерное, дополнительно улучшает эксплуатационные показатели [5].

При этом микроструктура поверхности до и после обработки выглаживанием представлена на рисунке 3, а параметры поверхности приведены в таблице 2.

Отделочно-упрочняющая обработка методом выглаживания является перспективным и технологически доступным способом повышения эксплуатационных характеристик деталей типа "Ось".



Рисунок 3 – Микроструктура поверхности до и после обработки выглаживанием

Таблица 2 – Изменения основных характеристик поверхности после выглаживания.

Характеристика	До обработки	После обработки	Единицы
Шероховатость Ra	до 0,8	0,02 – 0,1	мкм
Глубина упрочнённого слоя	-	до 0,2	мм
Остаточное напряжение	-	> 200	МПа
Микротвердость	-	≥ 4000	Мпа

Метод позволяет значительно улучшить качество поверхности, увеличить микротвердость и глубину упрочненного слоя, а также формирует остаточные напряжения сжатия, что в итоге повышает износостойкость и устойчивость к усталостным нагрузкам. Практическое применение данного метода на машиностроительных предприятиях способствует повышению надежности и

долговечности узлов, снижая необходимость в частом ремонте и снижая производственные затраты.

ЛИТЕРАТУРА

- Бафаев, Д. Х. Алмазное выглаживание поверхностного слоя деталей машин и выбор оптимального режима выглаживания / Д.Х. Бафаев

// Молодой ученый. – 2016. – № 5(109). – С. 16-18. – EDN VPIZGJ.

2. Тарасов, Д.В. Исследование процесса отделки каналов Экструзионным выглаживанием / Д.В. Тарасов, Л.П. Сысоева, А.С. Сысоев // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2012. – Т. 1, № 8. – С. 32-33. – EDN TAPGKT.

3. Губанов, В.Ф. Методология внедрения процесса выглаживания в производство / В.Ф. Губанов // Технология машиностроения. – 2014. – № 3. – С. 22-24. – EDN SCCHWX.

4. Губанов, В.Ф. Методология внедрения процесса выглаживания в производство / В.Ф. Губанов // Технология машиностроения. – 2014. – № 3. – С. 22-24. – EDN SCCHWX.

5. Остапчук, А.К. Применение выглаживания для обеспечения оптимальной шероховатости поверхности катания / А.К. Остапчук, А.Е. Тютнев, А И. Шашков // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2015. – Т. 1. – С. 118-121. – EDN TXLTST.

УДК 678.029.3

Каримбоев Абдулазиз Азад Угли, магистрант кафедры «Машиностроение, энергетика и автомобильный транспорт» РИ(ф)МПУ,
Akarimboev@bk.ru

Татарников Николай Николаевич, начальник бюро ИАСУ АО «Государственный Рязанский приборный завод», Tatarnicovn.n@yandex.ru,
SPIN 1542-9325

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ «КОРПУС» С ИССЛЕДОВАНИЕМ ВЛИЯНИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА НА ШЕРОХОВАТОСТЬ И ВОЗНИКНОВЕНИЕ АВТОКОЛЕБАНИЙ

Аннотация: в статье рассматриваются пути совершенствования процесса механической обработки детали «Корпус» на станках с ЧПУ. Основное внимание уделено исследованию влияния траектории движения режущего инструмента (стратегии CAM-программирования) на два ключевых параметра: шероховатость обработанной поверхности и возникновение автоколебаний (вibrаций). Проведен анализ различных стратегий, предложены рекомендации по оптимизации технологического процесса для повышения качества и производительности.

Ключевые слова: корпус, механическая обработка, ЧПУ, траектория инструмента, шероховатость, автоколебания, вибрация, стратегия обработки, CAM-

Введение

Деталь «Корпус» является типичной представительницей класса базовых и ответственных деталей в машиностроении и приборостроении. Она характеризуется наличием фланцев, посадочных отверстий с высокой точностью, пазов и

сложных криволинейных поверхностей. Требования к такой детали включают в себя не только точность геометрических размеров, но и высокое качество поверхностного слоя, которое напрямую влияет на эксплуатационные характеристики: усталостную прочность, износостойкость, герметичность соединений.

Традиционный технологический процесс изготовления корпуса часто основывается на устоявшихся, но не всегда оптимальных подходах к выбору режимов резания и, что особенно важно, траектории движения инструмента. Неоптимальная траектория может приводить к двум основным проблемам:

1. Неудовлетворительная шероховатость поверхности.
2. Возникновение автоколебаний (вибраций), что ведет к снижению стойкости инструмента, ухудшению качества поверхности и риску выхода из строя оборудования.

Таким образом, целенаправленное исследование и оптимизация траектории движения инструмента является актуальной задачей для совершенствования всего технологического процесса.

1. Анализ влияния траектории инструмента на шероховатость поверхности

Шероховатость поверхности формируется в результате взаимодействия режущей кромки инструмента с материалом заготовки. Траектория движения определяет геометрию этого взаимодействия.

1.1. Стратегии обработки плоских поверхностей:

- Параллельные проходы (Zig-Zag): Наиболее простая стратегия. Инструмент движется параллельными рядами. В местах разворота (врезания и выхода) часто наблюдается ухудшение шероховатости из-за изменения направления подачи и возникновения ударов.

- Постоянное встречное фрезерование (Climb Milling): При этой стратегии вектор скорости подачи совпадает с направлением скорости

резания на входе стружки. Это обеспечивает более плавное врезание, меньшие усилия резания и, как следствие, более низкую шероховатость по сравнению с попутным фрезерованием.

- Однопроходная чистовая обработка: Использование одного непрерывного прохода для всей плоскости предпочтительнее, так как исключает «ступеньки» на стыке проходов, неизбежные при многопроходной обработке.

1.2. Стратегии обработки сложноконтурных поверхностей (3D-обработка):

- Параллельная обработка по осям X/Y: Эффективна для деталей с небольшой кривизной. Однако на крутых склонах шаг обработки (scallop height) увеличивается, что приводит к увеличению шероховатости. Требуется уменьшение шага, что увеличивает время обработки.

- Обработка по параллельным окружностям (Spiral): Идеальна для сферических и полусферических элементов. Обеспечивает плавное, непрерывное движение инструмента без резких изменений направления, что способствует получению равномерной и минимальной шероховатости.

- Радиальная обработка: Инструмент движется от центра к периферии или наоборот. Может быть эффективна для круглых элементов, но требует контроля скорости резания на периферии.

- Проекционные стратегии (по нормали): Инструмент всегда движется перпендикулярно обрабатываемой поверхности. Это обеспечивает постоянные геометрические условия резания и стабильное качество поверхности на сложном рельфе.

Вывод по разделу: Для достижения минимальной шероховатости необходимо выбирать стратегии, обеспечивающие:

- Постоянное встречное фрезерование.

- Непрерывность движения (минимизацию остановок и разворотов).

- Постоянство угла контакта инструмента с заготовкой.

- Обработку по направлению, совпадающему с вектором нормали к поверхности.

2. Исследование влияния траектории на возникновение автоколебаний

Автоколебания (вибрации, «дребезг») – самовозбуждающиеся колебания системы «станок-приспособление-инструмент-деталь» (СПИД), являющиеся бичом высокоскоростной и высокопроизводительной обработки.

2.1. Физика возникновения вибраций:

Вибрации возникают из-за динамической неустойчивости процесса резания. Регулярные возмущения (удары при входе инструмента в материал, неоднородность материала) совпадают с собственной частотой системы СПИД, вызывая резонанс.

2.2. Роль траектории: Траектория движения инструмента напрямую влияет на характер и величину возмущающих воздействий.

- Резкие изменения направления и скорости: Стратегии с частыми разворотами на 180° (Zig-Zag) или резкими угловыми перемещениями создают значительные динамические нагрузки, которые являются триггером для возникновения вибраций.

- Переменное сечение среза: Стратегии, при которых толщина и ширина среза постоянно и резко меняются (например, при обработке острых углов), приводят к пульсирующим силам резания. Это является основной причиной возбуждения автоколебаний.

- Неравномерное силовое нагружение: Траектории, которые приводят к попеременной нагрузке на разные зубья фрезы или к резкому изменению зоны контакта, крайне нестабильны.

2.3. Оптимизационные стратегии для подавления вибраций:

- Трохоидальное фрезерование (Trochoidal Milling): Инструмент движется по круговой траектории, плавно врезаясь в материал. Эта стратегия позволяет поддерживать постоянную и оптимальную толщину стружки, минимизирует тепловыделение и кардинально снижает вероятность вибраций, особенно при обработке глубоких пазов и труднобрабатываемых материалов.

- Постепенное врезание и выведение (Ramp-in, Helical Bore): Вместо резкого осевого врезания используется наклонное или спиральное движение, что обеспечивает плавное нарастание нагрузки.

- Адаптивное фрезерование (Adaptive Clearing): Современные CAM-системы позволяют генерировать траектории, которые автоматически поддерживают постоянную нагрузку на инструмент, огибая внутренние углы по плавной радиальной траектории и избегая резких изменений направления.

В таблице 1 приведены все преимущества и недостатки стратегий. На рисунке 1 визуально представлены оптимальные стратегии для подавления вибраций.

Таблица 1 – Преимущества, недостатки и рекомендации к применению стратегий

Стратегия	Преимущества	Недостатки	Рекомендации к применению
Zig-Zag	Высокая производительность, минимум холостых ходов	Нестабильное качество поверхности, вибрации на разворотах	Черновая обработка, где скорость важнее качества
One-Way	Стабильное качество поверхности (постоянное встречное фрезерование)	Увеличение времени на холостые ходы	Чистовая обработка ответственных поверхностей
По контуру	Плавность хода, равномерная нагрузка на инструмент, хорошее качество	Может занимать больше времени, чем Zig-Zag	Обработка прецизионных плоскостей, обработка материалов, склонных к вибрациям

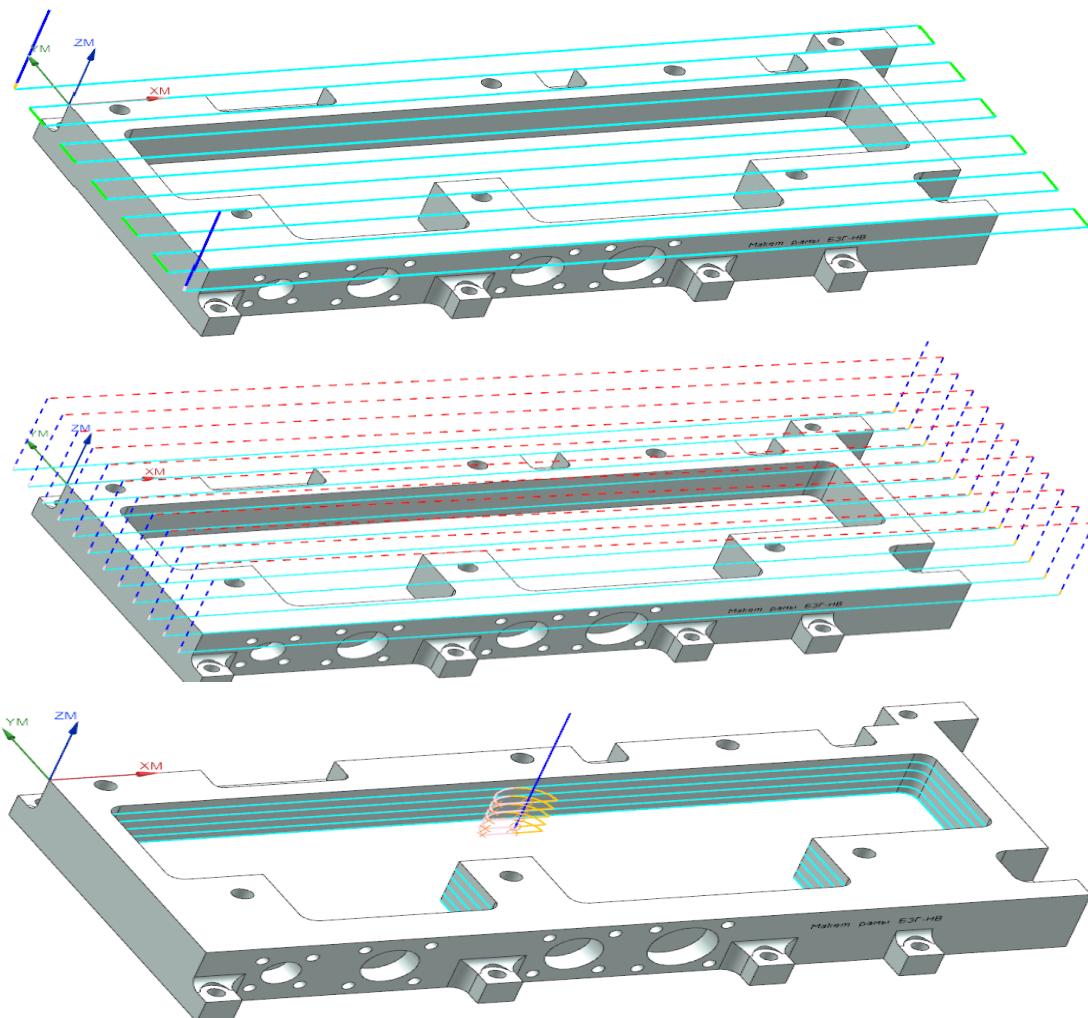


Рисунок 1 - Стратегии для подавления вибраций

3. Предложения по совершенствованию технологического процесса изготовления детали «Корпус»

На основе проведенного анализа предлагается следующий комплекс мер:

1. Разделение обработки на черновую и чистовую стадии:

- Черновая обработка: Применение высокопроизводительных стратегий (HPSE), таких как адаптивное или трохоидальное фрезерование.

Цель – максимальное съем материала при минимальных вибрациях и нагрузке на станок.

- Чистовая обработка плоскостей: Использование стратегии постоянного встречного фрезерования с одним непрерывным проходом.

- Чистовая обработка криволинейных поверхностей: Применение спиральной или проекционной (по нормали) стратегии с постоянным шагом для обеспечения равномерной шероховатости.

2. Оптимизация переходных элементов:

- Замена резких угловых перемещений на плавные дуговые интерполяции.
- Использование тангенциальных подводов и отводов инструмента.

3. Внедрение модуля анализа САМ-программ: Использование специализированного ПО, которое позволяет визуализировать и анализировать силовые нагрузки, толщину стружки и потенциально опасные участки траектории до отправки программы на станок.

4. Экспериментальная проверка: Для критических поверхностей корпуса рекомендуется провести пробную обработку с использованием 2-3 различных стратегий с последующим контролем шероховатости (профилометром) и визуальной оценкой следов вибраций.

Выводы

Совершенствование технологического процесса изготовления детали «Корпус» не ограничивается лишь подбором режимов резания. Ключевым резервом для повышения качества, точности и производительности является осознанный выбор траектории движения режущего инструмента.

Проведенное исследование показало, что:

- Для достижения низкой шероховатости необходимы стратегии с плавными, непрерывными движениями и постоянными условиями резания.

УДК 621.77.04

Кобытяева Яна Евгеньевна, студент

РИ(ф)МПУ, kobytaevaana@gmail.com

Маникина Дарья Андреевна, студент

РИ(ф)МПУ, dmanikina@yandex.com

Аверин Николай Витальевич, ст. преподаватель кафедры «Машиностроение, энергетика и автомобильный транспорт» РИ(ф)МПУ,

n.v.averin@yandex.ru, SPIN 9727-3104

3D-ПЕЧАТЬ КАК АКТУАЛЬНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Аннотация: в статье рассматриваются особенности применения 3D-печати в машиностроении для оптимизации производственных процессов, включая прототипирование, мелкосерийное производство и ремонт. Анализируются преимущества технологии в условиях цифровой

- Для подавления автоколебаний необходимо избегать резких изменений направления и нагрузки, отдавая предпочтение трохоидальным и адаптивным стратегиям.

- Внедрение предложенных мер позволит не только повысить качество выпускаемых корпусов, но и увеличить стойкость инструмента, снизить нагрузку на оборудование и, в конечном счете, повысить экономическую эффективность производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алтунин, В.В. Динамика процессов резания материалов. – М.: Машиностроение, 2018.
2. Современные технологии фрезерной обработки в CAD/CAM системах. / Под ред. С.П. Грубова. – СПб.: Политехника, 2021.
3. Altintas, Y. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design. – Cambridge University Press, 2012.
4. Инструкции и техническая документация ведущих производителей CAM-систем (Siemens NX, Dassault Systèmes, Autodesk PowerMill).
5. Стратегии высокоскоростной обработки в CAM системе. Татарников Н.Н., Белебуский Б.Ф. В сборнике: Машиноведение и инновации. Конференция молодых учёных и студентов (МИКМУС-2017). Материалы конференции. 2018. С. 33-35.

трансформации промышленности, с акцентом на сокращение затрат, времени и отходов.

Ключевые слова: 3D-печать, аддитивные технологии, машиностроение, оптимизация производства, прототипирование.

В настоящее время технологии послойного выращивания деталей становятся одним из ключевых направлений развития машиностроения. Эта инновационная методика изготовления деталей позволяет существенно оптимизировать производственные процессы, повысить гибкость производства и снизить издержки. В условиях цифровой трансформации промышленности, когда требования к скорости вывода новых продуктов на рынок и индивидуализации изделий постоянно растут, аддитивные технологии открывают новые возможности для машиностроительных предприятий [1].

3D-печать находит широкое применение на различных этапах производственного цикла. Одним из наиболее востребованных направлений

является прототипирование. Технология позволяет быстро создавать точные и функциональные модели, что значительно сокращает время разработки новых изделий. В отличие от традиционных методов, где изготовление прототипа может занять недели или даже месяцы, аддитивное производство позволяет получить физический объект за считанные дни или часы. [2]

Кроме того, 3D-печать активно используется для мелкосерийного производства деталей. В тех случаях, когда объемы выпуска невелики, а изделия имеют сложную геометрию или требуют индивидуальной настройки, традиционные методы обработки становятся экономически невыгодными. Аддитивные технологии позволяют изготавливать такие детали без необходимости создания дорогостоящих оснасток и штампов, что снижает затраты и время производства. [3]

В крупносерийном производстве 3D-печать применяется для компонентов, которые трудно произвести традиционными методами. Использование аддитивных технологий позволяет создавать детали, снижая массу без потери эксплуатационных характеристик. Важным преимуществом можно выделить сокращение времени переналадки производства при смене модели, что существенно снижает время простоя оборудования.

Еще одним важным направлением является ремонт и восстановление изношенных деталей. Методы послойного наплавления позволяют наращивать материал на поврежденные участки,

Таблица 1 – Сравнительный анализ затрат на производство корпуса редуктора в процессе фрезеровки[6]

Параметр	3D-печать(FDM)	Фрезеровка
Стоимость материалов	\$150	\$120
Затраты на обработку	\$75	\$200
Затраты на инструменты	\$0	\$3000
Время производства	6 часов	12 часов
Эксплуатационные расходы	\$50	\$100

Как видно из таблицы, значительную часть затрат при аддитивном производстве занимают расходы на материал, которые как правило, превышают такие расходы при производстве методами литья или механической обработки заготовок стандартного сортамента. Вместе с тем исключаются затраты на разработку изготовления приспособлений, отсутствует необходимость изготовления и организации хранения литейных форм, что играет существенную роль при мелкосерийном производстве. Себестоимость одной детали, произведенной методом 3D-печати,

что снижает затраты на закупку новых компонентов и время простоя оборудования. Это особенно актуально для крупногабаритных и дорогостоящих деталей, таких как корпуса турбин, шестерни и другие узлы. [4]

По результатам исследований, проведенных в ведущих машиностроительных компаниях, установлено, что использование 3D-печати позволяет сократить время. Это достигается за счет прямого преобразования цифровых моделей (CAD) в физические объекты без необходимости промежуточных этапов и сложной подготовки. Примером является деталь «Улитка» весом 500 кг для насосной установки, производимая на Российской горно-металлургической компании «Норникель». При использовании традиционных методов производства на замену подобного узла уходило около года (из-за проектирования, опыта, чертежей и пр.). Применили 3D-печать, отсканировали и перевели в 3D, создали форму, изготовили деталь. В итоге время производства удалось сократить на 50 %. Еще одним аспектом является снижение стоимости изготовления отдельных деталей, по сравнению с закупкой у поставщиков. «Норникель» использовала импортную деталь стоимостью около 160 евро, в итоге она была заменена на аналог, напечатанный за несколько сотен рублей. [5]

Кроме того, аддитивные технологии минимизируют отходы материалов на 30-50%, что является важным фактором в условиях роста цен на сырье и стремления к устойчивому развитию.

составляет \$275 против \$3420 для фрезеровки [6]. Аналогичную картину можно наблюдать при сравнении методов селективного лазерного спекания с литьем под давлением. (таблица 2)

Несмотря на то, что стоимость исходного материала 3D-печати является более высокой, вместе с тем отсутствие затрат на режущий инструмент и технологическую оснастку в целом делает более эффективным изготовление аддитивными методами при выпуске изделий единичного и мелкосерийного производства. [6]

Таблица 2 – Сравнительный анализ затрат на производство корпуса редуктора в процессе литья под давлением[6]

Параметр	3D-печать(SLS)	Литьё под давлением
Стоимость материалов	\$400	\$350
Затраты на обработку	\$125	\$600
Затраты на инструменты	\$0	\$8000
Время производства	8 часов	16 часов
Эксплуатационные расходы	\$90	\$180

В отечественном производстве ярким примером применения аддитивных технологий можно наблюдать при создании продукции на заводе "КамАЗ". С помощью 3D-печати изготавливают, например: пластиковые запчасти (заглушки, фиксаторы, корпусы, держатели); прототипы и малые партии изделий для тестирования перед внедрением в производство; экстренное производство компонентов для исключения простоя оборудования (например, напечатаны звенья кабелеукладчиков, держатели для инструментов, форсунки распылителя водной завесы для окрасочной камеры). [7]

Корпорация "Ростех" также активно применяет в создании изделий 3D-печать. Один из примеров применения аддитивных технологий в «Ростехе» – создание корпуса первой опоры компрессора вертолётного двигателя ВК-1600В. С их помощью цикл разработки занял около 4 недель, а готовое изделие напечатали за 168 часов. При этом удалось улучшить прочностные характеристики детали. В объединённой двигателестроительной корпорации для 3D-печати используют широкий спектр материалов: полимеры и пластмассы, металлические порошки на основе титана, алюминия, стали, никеля, кобальта. [8]

В последние годы 3D-печать активно внедряется не только в промышленность, но и в образовательные программы. В Рязанском институте (филиале) Московского политехнического университета аддитивные технологии рассматриваются, прежде всего, как средство подготовки специалистов к современным вызовам инженерии и промышленности. Освоение 3D-печати даёт студентам практические навыки, напрямую востребованные на рынке труда: моделирование и проектирование деталей различной сложности, выбор оптимальных материалов для конкретных задач, настройка параметров оборудования,

а также контроль качества готовых изделий. В результате студенты знакомятся с полным циклом технологического процесса – от идеи и цифровой модели до готового прототипа или функциональной детали.

Применение аддитивных технологий в образовательном процессе позволяет формировать компетенции, необходимые для работы в машиностроении, приборостроении, медицинской инженерии и других высокотехнологичных сферах. Студенты учатся использовать фотополимеры и металлизированные материалы для решения конкретных инженерных задач, что обеспечивает их готовность к практической деятельности на производстве. Кроме того, акцент делается на развитии навыков проектного мышления, когда 3D-печать становится инструментом проверки инженерных решений, оптимизации конструкции и снижения затрат на разработку.

3D-печать находит применение и в декоративной сфере – для создания макетов, сувенирной продукции и визуализации проектов, – ключевое значение в образовательном процессе института имеет именно формирование технологических навыков. Таким образом, выпускники выходят на рынок труда уже с опытом работы с современным оборудованием и пониманием специфики аддитивного производства, что существенно повышает их конкурентоспособность.

Эффективность применения 3D-печати значительно возрастает при интеграции с традиционными методами производства, такими как обработка на станках с ЧПУ. Комбинированный подход позволяет достичь высокой точности и прочности готовых изделий, сохраняя при этом преимущества аддитивных технологий. Например, после печати сложной формы деталь может подвергаться механической обработке для достижения требуемых допусков и качества поверхности.



а) Приспособление для вибрационной галтовки



б) Прототип космического корабля «Буран»

Рисунок 1 – Модели, разработанные сотрудниками студенческого конструкторского бюро Рязанского института (филиала) Московского политехнического университета

Несмотря на очевидные преимущества, 3D-печать сталкивается с некоторыми недостатками. К ним относятся ограничения по скорости производства при масштабных объемах, что делает технологию менее эффективной для массового выпуска изделий. [9]

Кроме того, существуют ограничения по размерам и материалам изготавливаемых деталей, а также вопросы долговечности и надежности изделий, требующие дальнейших исследований и испытаний.

Одним из существенных вызовов в развитии аддитивных технологий является дефицит квалифицированных специалистов. Наиболее эффективным способом преодоления данной проблемы становится формирование собственных кадровых ресурсов посредством системного обучения и профессиональной подготовки. Инвестиции в развитие персонала в этом случае выступают стратегически важным фактором, обеспечивающим устойчивое развитие компаний. Дополнительно целесообразно выстраивать партнерские отношения с профильными университетами и исследовательскими центрами, где уже ведётся подготовка специалистов в области аддитивного производства. Такой подход позволяет не только закрывать кадровые потребности, но и формировать долгосрочный фундамент для инновационного роста. [10]

Перспективы развития аддитивных технологий напрямую связаны с комплексным совершенствованием всех элементов производственного процесса. В первую очередь, это касается повышения качества и скорости печати, что позволит значительно расширить спектр применения технологий в промышленности, медицине и других отраслях. Существенное значение имеет и расширение ассортимента материалов: всё более активно разрабатываются и внедряются высокопрочные композиты, биосовместимые материалы,

а также металлы с улучшенными физико-механическими характеристиками, что открывает возможности для производства изделий, ранее недостижимых методами аддитивного производства.

Отдельного внимания заслуживает внедрение современных систем автоматизации, которые обеспечивают стабильность технологического процесса, сокращают влияние человеческого фактора и позволяют поддерживать высокую точность изготовления. Такие решения делают возможным многоуровневый контроль качества, ускоряют производственные циклы и повышают эффективность использования ресурсов. Всё это в совокупности формирует основу для дальнейшей интеграции аддитивных технологий в промышленное производство, превращая их в один из ключевых инструментов современной индустрии. [11]

3D-печать становится ключевым инструментом цифровой трансформации машиностроения, оптимизируя производство и меняя традиционные методы проектирования и изготовления. Эта технология позволяет создавать сложные и экономичные детали, сокращать время прототипирования и внедрять инновации. Несмотря на преимущества, существуют недостатки: высокая стоимость оборудования, нехватка квалифицированных специалистов, ограничения по материалам и стандартам качества. Широкое применение и развитие аддитивных технологий стимулируют инновационный прогресс и способствуют появлению новых технологий, превращая их в ключевой стратегический ресурс для промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мадлен П. 3D-печать Tesla [Электронный ресурс] URL: <https://www.3dnatives.com/> (дата обращения: 15.09.2025)

2. Борисов, Г.В. Экономические аспекты внедрения аддитивных технологий в промышленность. Казань: КНИТУ, 2019.

3. Горунов, А.И. Аддитивные технологии и материалы: учебное пособие / А.И. Горунов. – Казань: КНИТУ-КАИ, 2019. – 56 с

4. Преображенская, Е.В. Технологии, материалы и оборудование аддитивных производств: учебное пособие / Е.В. Преображенская, Т.Н. Боровик, Н.С. Баранова. – Москва: РГУ МИРЭА, 2021 – Часть 1–2021. – 173 с.

5. 3D-печать на заводе двигателей «КАМАЗа»: сокращение простоев [Электронный ресурс] URL: https://vestikamaza.ru/posts/na_kamaze_primenayut_additivnye_tehnologii/ (дата обращения: 22.09.2025)

6. Анализ экономической целесообразности применения аддитивных технологий (3D-печати) в механическом машиностроении [Электронный ресурс] URL:<https://moluch.ru/archive/555/122215>(дата обращения: 22.09.2025)

7. 3D-печать на заводе двигателей «КАМАЗа»: сокращение простоев [Электронный ресурс] URL: https://vestikamaza.ru/posts/na_kamaze_primenayut_additivnye_tehnologii/ (дата обращения: 22.09.2025)

8. Аддитивные технологии в авиастроении. Ростех внедряет инновации [Электронный ресурс] URL: <https://ntr.pf/events/additivnye-tehnologii-v-aviastroenii-rostekh-vnedryat-innovatsii/> (дата обращения: 22.09.2025)

9. Кравченко, Е.Г. Аддитивные технологии в машиностроении: учебное пособие / Е.Г. Кравченко, А.С. Верещагина, В.Ю. Верещагин. — Комсомольск-на-Амуре: КНАГУ, 2018. — 140 с.

10. 5 основных проблем 3D-печати и пути их решения [Электронный ресурс] URL: <https://blog.iqb.ru/jabil-3d-printing-challenges/> (дата обращения: 22.09.2025)

11. Докторов, А.Ю. Стандартизация и сертификация аддитивных технологий. Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2020.

УДК 621-192

Кузнецова Алина Романовна, студент
РИ(ф)МПУ, n.v.averin@yandex.ru

Научный руководитель:

Аверин Николай Витальевич, ст. преподаватель кафедры «Машиностроение, энергетика и автомобильный транспорт» РИ(ф)МПУ,
n.v.averin@yandex.ru, SPIN 9727-3104

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКЕ

Аннотация: в статье рассматриваются современные подходы к применению цифровых технологий и методов компьютерного зрения для контроля качества поверхностей деталей на этапе финишной обработки. Особое внимание уделяется возможностям автоматизации контроля, обеспечивающего высокую точность и объективность оценки, а также снижению влияния человеческого фактора. Представлены примеры внедрения систем машинного зрения в промышленности и обозначены перспективы их развития в контексте цифровой трансформации производства.

Ключевые слова: компьютерное зрение, контроль качества, цифровые технологии, финишная обработка, машиностроение.

Современное машиностроение предъявляет строгие требования к качеству поверхности деталей после операций шлифования, полирования, суперфиниша, хонингования и других методов чистовой обработки. Качество поверхности определяется совокупностью её свойств (шероховатостью, твердостью, остаточными напряжениями и др.), причём шероховатость является одним из ключевых показателей [2]. Классические методы нормирования и контроля шероховатости описаны в работах [2] Ю.Г. Шнейдера. Однако ручной или контактный контроль затруднён и неэффективен на массовом производстве. В то же время цифровые технологии и методы машинного зрения позволяют автоматизировать визуальный и измерительный контроль без участия человека [1].

Финишные обработки (шлифование, полирование, суперфиниш, хонингование) улучшают геометрию поверхности и снижают её шероховатость, повышая долговечность и функциональность деталей. После таких операций на поверхности могут оставаться микроповреждения, риски, задиры и другие дефекты. Задача контроля – обнаружить невидимые глазу дефекты,

проверить соответствие шероховатости и геометрии требуемым нормам. Компьютерное зрение позволяет измерять не только профиль, но и оценивать текстуру поверхности по серии изображений [1,2].

Системы машинного зрения уже применяются в различных отраслях машиностроения. Так, на Магнитогорском металлургическом комбинате (ММК) внедрена автоматизированная система проверки характеристик листового проката на основе машинного зрения [5]. Сканирующие камеры фиксируют движущийся лист стали, автоматически создавая трёхмерную карту поверхностных дефектов. Благодаря этому уменьшены брак и рекламации, улучшено соответствие толщины и ровности нормам. При детектировании дефектов системы машинного зрения учитывают форму, размер и распределение рисок и вмятин. К примеру, система ММК формирует отчёт по каждому прокату, включая выявленные вмятины, заусенцы и шероховатость, что даёт возможность мгновенно корректировать режим прокатки.



Рисунок 1 – Камера машинного зрения

На рыбинском предприятии ОДК-Сатурн для работы с деталями из полимерных композиционных материалов для серийного авиадвигателя ПД-14 применяется автоматизированная система ультразвукового контроля (Рисунок 2). Установка позволяет выявлять дефекты в деталях со сложной пространственной геометрией. Такие системы позволяют сократить человеческий фактор и ускорить приёмку деталей.

В частности, [3] в своей работе Авсиевич и соавт. описали опыт внедрения на линии сборки полуприцепов машинного зрения, где система выполняла комплексный контроль всех этапов.



Рисунок 2 – Система ультразвукового контроля деталей авиационных двигателей на рыбинском предприятии ОДК-Сатурн

Авторы отмечают, что сочетание машинного зрения с системами позиционирования объектов позволило автоматизировать выявление типовых операций и нарушений технологического процесса без необходимости больших обучающих выборок. В ходе апробации на сборочном конвейере реализованы функции: контроль безопасности, подсчёт изделий, отслеживание перемещений сотрудников и сбор статистики по каждому посту. Результаты показали, что современные системы машинного зрения эффективны для мониторинга производства и контроля качества выпускаемой продукции.

Общая тенденция подтверждается и независимыми исследованиями. Например, в [4] статье описан алгоритм интеллектуальной системы контроля качества, способный обеспечивать точность измерений порядка 97–98% при погрешности не более 3%. Для сравнения, при ручном контроле точность обычно ниже (85–95%), а при использовании дорогостоящих лазерных сканеров – примерно 90–95%. Это свидетельствует об экономии средств и существенном повышении качества при внедрении компьютерного зрения в производственные процессы.

Вместе с тем, развитие технологий компьютерного зрения выходит за рамки уже приведённых примеров. Одним из наиболее перспективных направлений является интеграция CV-систем с другими цифровыми решениями. Так, цифровые двойники – виртуальные копии реальных объектов и процессов – позволяют объединять данные с камер машинного зрения и моделями производства для проведения виртуальных испытаний и прогнозирования отказов. В результате появляется возможность сравнивать фактическое состояние детали с цифровой моделью, оперативно выявлять отклонения и заблаговременно планировать ремонт, что снижает простой и издержки.

Однако практическое внедрение подобных решений сопряжено с рядом трудностей. С технической точки зрения серьёзной проблемой остаются

высокие первоначальные затраты: оборудование, программное обеспечение и вычислительные мощности требуют значительных инвестиций. Кроме того, обучение нейросетевых моделей невозможно без больших объёмов размеченных данных, получение которых на реальном производстве зачастую затруднено. Ситуацию осложняет и изменчивость условий эксплуатации: освещение, вибрации, загрязнения и т.д.

Следует отметить, что потенциал компьютерного зрения значительно шире рамок машиностроения. Уже сегодня такие системы активно внедряются в пищевой промышленности, где они контролируют состав и качество продукции, выявляют дефекты упаковки и проверяют корректность маркировки. В фармацевтике CV применяется для автоматизации контроля таблеток и капсул, а также для проверки целостности блистеров и этикеток. В логистике подобные системы ускоряют сортировку и учёт грузов, распознают штрих- и QR-коды и отслеживают перемещение ящиков, обнаруживают повреждённые товары и даже управляют роботизированными погрузчиками. В результате предприятия получают ускоренные процессы обработки заказов, снижение ошибок и более высокую эффективность снабжения. Таким образом, внедрение компьютерного зрения демонстрирует впечатляющие результаты в самых разных областях, обеспечивая более высокую скорость, объективность и надёжность контроля качества изделий.

Таким образом, применение цифровых технологий и машинного зрения значительно расширяет возможности контроля качества поверхностей деталей после финишной обработки. Системы компьютерного зрения (CV) способны объективно оценивать шероховатость, выявлять дефекты и проводить измерения быстрее и точнее традиционных методов, особенно на высокоскоростных производственных линиях. Примеры успешных внедрений в металлургии и авиапромышленности демонстрируют практическую полезность таких систем: они оптимизируют процессы, снижают долю

брака и создают базу для дальнейшей автоматизации [3-6]. В то же время остаются задачи и вызовы: необходима разработка специализированных нормативов и стандартов для CV-систем, обучение персонала и создание опытных полигонов для испытаний. Очевидно, что перспективы лежат в интеграции машинного зрения в «умные» промышленные комплексы: при дальнейшей цифровизации производства эти технологии станут неотъемлемой частью управления качеством. Глубокое изучение возможностей CV и распространение лучших практик по их применению позволит обеспечить более высокое качество изделий и повысить конкурентоспособность промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корк П. Машинальное зрение. Основы и алгоритмы с примерами на MATLAB. М.: ДМК-Пресс, 2023.
2. Шнейдер Ю.Г. Нормирование и контроль качества поверхности деталей машин. Л., 1969.
3. Авсиевич А.В., Авсиевич В.В., Арысланов Ф.С., Иващенко А.В., Щербаков М.А. Организация производственного контроля на линии сборки полу-прицепов с использованием машинного зрения // Известия Самарского научного центра РАН. 2024. Т. 26, № 6. С. 142–147.
4. Шилович О.Б., Гуляй В.Г., Марков А.И., Шаповалов Д.А. К вопросу улучшения качества анализа продукции путём применения алгоритмов компьютерного зрения // ЦИТИСЭ. 2023. № 1. С. 191–201.
5. Машинальное зрение контролирует качество толстого листового проката на ММК // ComNews. 09.01.2025. URL: <https://www.comnews.ru/>** (дата обращения: 10.01.2025).
6. Сорокин А. Гид по цифровому производству: машинное зрение в техническом контроле. Up-Pro.ru, 01.06.2021. URL: <https://up-pro.ru/>** (дата обращения: 01.07.2025).

УДК 621.793

Лебедев Сергей Петрович, магистрант кафедры «Машиностроение, энергетика и автомобильный транспорт» РИ(ф)МПУ,
serezha_lebedev00@list.ru

ИОННО-ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА ИНСТРУМЕНТА ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ Р6М5

Аннотация: исследуется влияние ионно-плазменного азотирования на ресурс режущего инструмента из быстрорежущей стали Р6М5. В качестве модельного объекта выбраны спиральные свёрла малого диаметра и концевая фреза. Обработка в тлеющем разряде при температуре от 400 °C до 450 °C в течение 20 мин в атмосфере N₂/H₂ сформировала диффузионный слой толщиной порядка от 20 до 40 мкм без

сплошной ε-нитридной корки. Микротвёрдость поверхности выросла с ~700–750 HV до 950–1050 HV при сохранении твёрдости сердцевины на уровне ~60–62 HRC. Металлографический контроль подтвердил наличие дисперсных нитридных выделений Fe-N и Me-N с плавным градиентом свойств по толщине слоя. Испытания на сверление конструкционной стали Ст3 и титанового сплава показали увеличение стойкости в ~2,5 раза и ~4 раза соответственно до достижения износа задней грани V B = 0,4 мм, наблюдалось существенное снижение адгезионного налипания и равномерный характер изнашивания режущих кромок. Сопоставление с данными по нитридным PVD-покрытиям указывает на сопоставимый прирост ресурса, при этом азотирование не требует высоких температур и не приводит к короблению готовых изделий. Анализируется потенциал сочетания диффузионного упрочнения и вакуумного покрытия для дополнительного повышения износостойкости за счёт улучшенной адгезии и сжимающих остаточных напряжений в подслое. Представлены рекомендации по выбору газовой среды и режимов разряда для получения диффузионного слоя без хрупкой поверхностной плёнки, пригодного для тонких режущих кромок инструмента из Р6М5.

Таблица 1 – Химический состав стали Р6М5 и твёрдость до/после азотирования

Показатель	Значение для стали Р6М5
Химический состав, мас, %	C 0,85–0,95; Cr 3,8–4,4; W 5,5–6,5; Mo 4,5–5,5; V 1,7–2,1; Si 0,2–0,5; Mn 0,2–0,5; Co ≤0,5; Ni ≤0,6; Cu ≤0,25; P ≤0,03; S ≤0,025
Твердость после термообработки	~63 HRC (~720 HV)
Твердость после азотирования	~66–67 HRC (950–1050 HV)
Структура после азотирования	Мартенсит + дисперсные нитриды Fe-N и Me-N (без сплошной нитридной корки)

Одним из эффективных методов упрочнения инструментальной стали является ионно-плазменная обработка. Под этим термином обычно подразумевают процессы, происходящие в разреженной газовой среде при электрическом разряде: диффузионное насыщение поверхности ионами (ионное азотирование, карбонитрирование и др.) либо осаждение износостойких покрытий методами вакуумной плазмы (нанесение нитридных покрытий TiN, TiAlN). [1]

В данной работе рассматривается влияние ионно-плазменного азотирования – как одного из видов ионно-плазменной обработки – на структуру, твёрдость и стойкость режущего инструмента из стали Р6М5. В качестве примера выбран

Ключевые слова: ионно-плазменное азотирование; быстрорежущая сталь Р6М5; спиральное сверло; микротвёрдость; диффузионный слой; стойкость инструмента; тлеющий разряд; азотный потенциал; металлография; градиент твёрдости; адгезионный износ; PVD-покрытия; TiN; комбинированное упрочнение.

Быстрорежущая сталь Р6М5 (отечественный аналог стали типа W6Mo5 или AISI M2) широко применяется для изготовления металлорежущего инструмента – свёрл, фрез, резцов, метчиков и др. Она содержит ~0,85–0,95 %, Cr 3,8–4,4% W 5,5–6,5% Mo 4,5–5,5% V 1,7–2,1% и небольшие количества Co, Ni и др. элементов. После термической обработки (закалка ~1200 °C с многократным отпуском ~560 °C) инструмент из Р6М5 достигает твёрдости ~60–63 HRC за счёт образования мартенситной матрицы с дисперсными карбидами легирующих элементов. Однако в процессе резания при высоких температурах на режущей кромке интенсивно развивается износ (абразивный, адгезионный, диффузионный), что ограничивает стойкость инструмента и производительность обработки. Повышение твёрдости и износостойкости режущего инструмента без потери его прочности является актуальной задачей материаловедения и машиностроения.

спиральный сверло малого диаметра, для которого особенно критично повышение износостойкости режущих кромок. Также обсуждаются возможности комбинированных методов (азотирование + нанесение износостойкого покрытия) для максимального увеличения ресурса инструмента.

Метод ионно-плазменного азотирования ионно-плазменной обработки заключается в диффузионном насыщении стали азотом в тлеющем разряде. Детали размещают в вакуумной камере, стенки которой служат анодом, а сами изделия – катодом. При подаче азотно-водородного газа и электрического разряда в камере образуется холодная плазма с ионами азота, бомбардирующими поверхность инструмента. Ионная

бомбардировка нагревает деталь и очищает её поверхность, после чего азот диффундирует в решётку железа, образуя нитриды и твёрдорастворные фазы. В зависимости от режима можно получить либо слой с развитой нитридной зоной (обеспечивает высокую коррозионную стойкость, но может быть хрупким), либо преимущественно диффузионный слой без сплошной нитридной корки – что предпочтительно для режущего инструмента. Главное преимущество ионно-плазменной обработки – отсутствие перегрева и коробления: процесс проводится при сравнительно низкой температуре (обычно от 450 до 600 °C для сталей) и не приводит к росту зерна или заметному снижению прочности основы. При этом твёрдость поверхности существенно возрастает за счёт формирования нитридных фаз (ϵ -Fe₂-3N, γ' -Fe₄N) и насыщенного азотом мартенсита.

Ионно-плазменное азотирование инструментальных быстрорежущих сталей изучается с 1970-х годов. Показано, что азотирование стали Р6М5 при ~500 °C в течение нескольких часов способно увеличить микротвёрдость поверхностного слоя в ~1,5–2 раза, в работе сообщается, что после ИПА при 500 °C в атмосфере диссоциированного аммиака твёрдость поверхности стали

Р6М5, возросла в 2 раза по сравнению с необработанным образцом (при длительности насыщения ≥ 8 часов). Согласно данным фирмы «Ионные технологии» (г. Пермь), низкотемпературное ионно-вакуумное азотирование готового инструмента из Р6М5 (при 400–450 °C, 15–30 мин) повышает его поверхностную микротвёрдость с ~700 до ~1000 кгс/мм², то есть примерно в 1,5 раза. Одновременно образуется диффузионный слой толщиной от 10 до 80 мкм в зависимости от режима, причём оптимальными признаны режимы, дающие слой больше 10 мкм при твёрдости больше 900 HV. Исследования микроструктуры показывают, что после азотирования под поверхностью стали Р6М5, формируется мелкодисперсная нитридная структура без непрерывной хрупкой «белой» нитридной плёнки – это важно, поскольку сплошная поверхностная ϵ -фаза нежелательна для режущих кромок (она может растрескиваться и осыпаться под нагрузкой).

В таблице 2 приведены ключевые параметры режимов азотирования и достигнутые характеристики слоя (глубина и твёрдость), установленные на основе наших предварительных экспериментов и литературных данных. [2] [3] [4]

Таблица 2 – Режим ионно-плазменного азотирования инструмента из Р6М5 (установка ИОН-25И)

Температура, °C	Выдержка, мин	Атмосфера	Давление, Па	Смещение на катоде, В	Протекший заряд, А·ч (~доза)
400–450	20	75% N ₂ + 25% H ₂	~200	350–400	0,1–0,2
Примечание: Оптимальный режим даёт слой глубиной 10–80 мкм при поверхностной твёрдости больше 900 HV					

Практический эффект ионно-плазменного азотирования инструмента из Р6М5 подтверждается рядом исследований. В автореферате Нагимова (2024) сообщается, что комплексная ИП-обработка (включающая азотирование) повышает стойкость резцов из Р6М5 в 1,5–2 раза. По данным промышленных испытаний, проведённых на заводе «Элекон», ресурс азотированных сверл из Р6М5 при сверлении конструкционной стали возрастает примерно в 2–3 раза, а при сверлении титанового сплава – до 5 раз. Это связано с тем, что азотирование повышает горячую твёрдость режущей кромки и препятствует адгезионному наплыванию вязких материалов на инструмент. Дополнительным механизмом упрочнения является образование в диффузионном слое нитридов легирующих элементов (нитридов вольфрама WN), которое способствует дисперсионному

твердофазному упрочнению основы. Таким образом, ионное азотирование создаёт поверхностный слой, устойчивый к износу и перегреву, что положительно сказывается на стойкости быстрорежущего инструмента.

Вакуумно-дуговое ионно-плазменное осаждение покрытий позволяет получать сверхтвёрдыеnanoструктурные слои, вакуумно-дуговое покрытие TiN на стали Р6М5, выполненное с ионной имплантацией (метод PBIID) при напряжении подложки от 40 В до 400 В, обладает микротвёрдостью порядка от 40 ГПа до 65 ГПа, что в несколько раз превышает твёрдость основы (для сравнения, 1000 HV ≈ 9,8 ГПа). Такие покрытия существенно увеличивают стойкость режущего инструмента. По литературным данным, применение нитридных покрытий на быстрорежущих

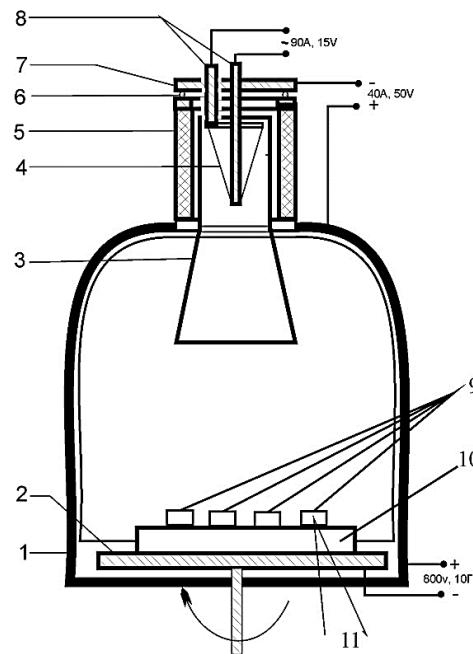
фрезах и свёрлах повышает их срок службы минимум в 2 раза, а при оптимальной толщине покрытия ~4 мкм период стойкости инструмента может достигать ~120 минут резания (при испытаниях на точение), что в 2–3 раза превышает стойкость непокрытого инструмента. Эффективность покрытий связана с тем, что они принимают на себя основное трение и нагрев, защищая базовый материал инструмента от износа и перегрева. Однако слишком толстые или хрупкие покрытия могут растрескиваться под нагрузкой, важна прочная адгезия покрытия к стали. Для улучшения сцепления применяют различные приёмы – предварительную ионную очистку, создание переходных адгезионных подслоёв (тонкого слоя нитрида титана или алюминия).

Таким образом, современные исследования свидетельствуют, что ионно-плазменные методы упрочнения весьма эффективны для быстрорежущих сталей. Ионное азотирование позволяет улучшить свойства поверхности (твёрдость, износостойкость) без ущерба для вязкости сердцевины, а вакуумно-плазменные покрытия – резко (в разы) снизить скорость изнашивания режущей кромки. Правильное сочетание этих технологий (азотирование при оптимальном потенциале + наноструктурное покрытие заданной толщины) способно обеспечить комплексное повышение стойкости инструмента из Р6М5 в несколько раз. В дальнейшем изложении приводятся экспериментальные данные, иллюстрирующие указанные эффекты на примере сверла из стали Р6М5.

Материалы и методика исследования

Объект исследования. Спиральные свёрла из быстрорежущей стали Р6М5 малых диаметров. В качестве модельного инструмента выбраны свёрла диаметром 1,6, 2,5 и 3,3 мм, а также фреза (концевой фрезерный инструмент) диаметром 6,0 мм из той же партии стали. Инструменты изготовлены по стандартной технологии и имели после шлифовки поверхность с шероховатостью $\sim R_a 0,32\text{--}0,63$ мкм. Твёрдость режущей части после заводской термообработки составляла ~63HRC (что соответствует микротвёрдости ~720 HV_{0,5}). Вид исследуемого сверла и его геометрические параметры схематично показаны на рисунке 1. [5] [6] [7]

Ионно-плазменная обработка. (рис. 1) Выбранные свёрла и образцы из этой же стали подвергали ионно-вакуумному азотированию.



1 – рабочая камера; / working chamber;
2 – рабочий столик; / work table; 3 – полый катод плазменного источника; / hollow cathode of the plasma source; 4 – нить накала катода; / cathode filament; 5 – соленоид плазменного источника; / plasma source solenoid; 6 – вакуумное уплотнение фланца плазменного источника; / vacuum seal of the plasma source flange; 7 – фланец катода плазменного источника; / plasma source cathode flange; 8 – водоохлаждаемые тоководы; / water-cooled current leads; 9 – образцы; / samples; 10 – трубчатый нагреватель; (ТЭН) / tubular heater (TEN); 11 – термопара хромель-алюмель / chromel-alumel thermocouple

Рисунок 1 – Схема установки для ионно-плазменного азотирования сталей

Процесс проводился в установке типа ИОН-25И (компания «Ionitech», Болгария) с водяным охлаждением стенок камеры. Азотирование осуществляли при температуре 400–450 °C в течение 15–30 минут изотермической выдержки. Рабочая атмосфера – смесь азота и водорода (соотношение N₂:H₂ около 3:1 по объёму) при давлении ~200Па. Детали размещали на катодном столе, перед основной стадией проводили ионную очистку поверхности (напуск небольшого количества Ar и разряд при повышенном смещении ~700 В в течение 5 минут). Непосредственно азотирование выполняли при смещении ~400 В на изделиях и токе разряда ~0,3А. Контроль температуры в процессе осуществлялся термопарой, а также по свечению плазмы. После выдержки камера охлаждалась ниже 200 °C в атмосфере азота перед разгерметизацией, чтобы исключить окисление азотированного слоя. Измерения твёрдости. Для оценки

поверхностной твёрдости до и после азотирования использован метод микротвердометрии по Виккерсу. Измерения проводили на приборе РМТ-3 при нагрузке 100 г (0,98Н) и времени выдержки под нагрузкой 10с. Микротвёрдость HV вычисляли по стандартной формуле:

$$HV = \frac{0,102 \cdot F}{d^2},$$

где F – нагрузка (Н), d – средняя длина диагонали отпечатка (мм).

Для контроля также выполнены измерения твёрдости основы (ядра) по Роквеллу (HRC). Кроме того, с помощью микротвёрдометра измерялось распределение твёрдости по поперечному сечению некоторых образцов – для определения толщины упрочнённого слоя (граничную глубину слоя условно принимали по точке, где микротвёрдость падала до уровня ~550 HV, близкого к твёрдости исходной ненасыщенной стали).

Анализ микроструктуры. Образцы для металлографического анализа вырезали из тела сверла после азотирования, зачищали шлифовкой и полировали. Травление проводили Nital-раствором для выявления структуры нитридных фаз. Микроструктуру поверхностного слоя изучали с использованием оптического металлографического микроскопа (увеличения $\times 50$, $\times 200$, $\times 500$). Также проводилась качественная оценка фазового состава нитридного слоя методом дифракционного анализа (метод ЭДС и рентгенофазового анализа на дифрактометре типа DRON, CuK α излучение).

Испытания на износстойкость. Стойкость азотированных и контрольных (необработанных) инструментов оценивали при сверлении и фрезеровании материалов различной обрабатываемости. В частности, проведены пробные эксперименты по сверлению конструкционной стали Ст3 ($\sigma_b \approx 500$ МПа) и титанового сплава BT5 (аналог Ti-6Al-4V) свёрлами диаметром 5 мм с различными режимами обработки поверхности. Сверление выполняли на вертикально-сверлильном станке при постоянной скорости резания 20 м/мин и подаче 0,05 мм $^{-1}$. Критерием отказа сверла принималось достижение предельного износа режущей кромки (фаски) по задней поверхности $V_B = 0,4$ мм либо разрушение сверла. Параллельно регистрировали акустический сигнал резания – по появлению характерного высокочастотного скрежета судили о выходе инструмента из строя. Для фрез диаметром 6 мм проводились испытания на фрезерование углеродистой стали 45 (HV ~180). По результатам испытаний определяли относительную стойкость

инструментов (число просверленных отверстий или длина пути резания до износа).

Все полученные экспериментальные данные статистически обрабатывались. Твёрдости приведены усреднённо по 5–7 измерениям. При оценке стойкости брались средние значения по 3 инструментам каждого вида. Погрешность измерений микротвёрдости не превышает ± 3 процента, при определении глубины слоя – ± 5 мкм.

Структура и твёрдость азотированного слоя. В результате ионно-плазменного азотирования на стали Р6М5 формируется упрочнённый поверхностный слой толщиной от десятков до сотен микрон в зависимости от времени процесса. В данной работе, при относительно короткой выдержке, глубина диффузационного слоя составила ~15–45 мкм. Более продолжительное насыщение приводит к пропорциональному росту толщины слоя: так, по литературным данным, при 500 °C скорость роста слоя в стали Р6М5 составляет порядка 15 мкм/ч. Следовательно, за 8 часов можно получить слой ~120 мкм, а за 16 часов – до ~200–250 мкм. Однако столь глубокий слой не требуется для мелких инструментов и может даже быть вреден из-за появления избыточной нитридной фазы по поверхности. В наших условиях кратковременного азотирования образуется преимущественно диффузационный слой без сплошной нитридной корки. Металлографически это выражается в отсутствия чётко отравленного «белого слоя» на шлифе: азотированный слой лишь слегка темнее основного металла после травления, с постепенным переходом к сердцевине. На микроструктуре видны дисперсные светлые включения – вероятно, нитриды ванадия и вольфрама – равномерно распределённые в закалённой мартенситной матрице основы. Сравнение структуры после стандартной термообработки и после азотирования показывает, что общее строение стали (мартенсит + карбиды) сохраняется, но в азотированном образце присутствует дополнительная мелкодисперсная фаза по границам и внутри зёрен – это и есть выделения нитридов ϵ -фазы ($Fe_{2-3}N$) и нитридов легирующих элементов. Их образование приводит к повышению твёрдости.

Исходная твёрдость быстрорежущей стали Р6М5 после термообработки составляла ~720 HV (что соответствует ~60–62 HRC). После ионно-плазменного азотирования твёрдость возросла до 950–1050 HV, то есть примерно на 30–50 %. Максимальная микротвёрдость отмечена у сверла диаметром 2,5 мм – около 1050 HV, что близко к значению 1100 HV, характерному для нитридной ϵ -фазы железа. Несколько меньшие значения (950–1000 HV) у сверл диаметром 1,6 и 3,3 мм

и фрезы диаметром 6,0 мм могут объясняться как индивидуальными разбросами, так и разницей в степени прогрева инструмента (мелкие сверла остывают быстрее в процессе, эффективная длительность диффузии могла быть чуть меньше). Тем не менее во всех случаях прирост твёрдости существенный – не менее чем на 250 ед. HV относительно базы. Это соответствует приблизительному повышению эквивалентной твёрдости с ~62 HRC до ~66–67 HRC. Величина твёрдости ~1000 HV близка к твёрдости тонкой закалённой белой нитридной плёнки. Однако важно подчеркнуть, что в наших образцах такой сплошной плёнки не наблюдалось – высокая твёрдость обусловлена

дисперсными нитридными выделениями внутри закалённой структуры. Данный вывод подтверждается и измерениями микротвёрдости по сечению: вблизи поверхности (первые 5 мкм) HV немного падает, что свидетельствует об отсутствии твёрдой корки (иначе у самой поверхности был бы максимум >1100 HV). Далее на глубине ~10–15 мкм микротвёрдость плавно уменьшается с ~900 HV до ~600 HV по мере перехода к сердцевине. Граница упрочнённого слоя по критерию 550 HV наблюдается на глубине ~20–40 мкм, что согласуется с металлографически видимой глубиной слоя.

Таблица 3 – Поверхностная микротвёрдость и глубина азотированного слоя (сталь Р6М5)

Образец (инструмент)	Микротвёрдость до азотирования, HV	Микротвёрдость после азотирования, HV	Глубина слоя h_m , мкм
Диаметр сверла 1,6 мм	700–750	950–1000	15–20
Сверло Ø2,5 мм	700–750	1000–1050	40–45
Сверло Ø3,3 мм	700–750	950–1050	35–40
Концевая фреза Ø6,0 мм	700–750	1000–1050	15–20

Примечание: базовая твёрдость 700–750 HV соответствует ~60 HRC. После азотирования твёрдость достигает 950–1050 HV (~66–68 HRC), рост примерно в 1,5 раза. Глубина слоя определена по металлографическим шлифам как расстояние до исчезновения нитридных продуктов.

Полученные результаты согласуются с данными других исследований, Каченюк и соавт. отметили увеличение микротвёрдости стали Р6М5 в 2 раза (до ~17 ГПа) при ионном азотировании 8–16 ч при 500 С. В нашей работе более мягкие режимы дали прирост твёрдости ~1,5 раза, что ожидаемо из-за меньшей дозы азота. Также отсутствие сплошной нитридной зоны соответствует выводам Петровой и др., которые регулировали азотный потенциал атмосферы: при снижении потенциала ниже определённого порога на Р6М5 не образуется нитридная корка, что улучшает качество слоя. В наших условиях (наличие водорода, пониженная температура) потенциал, видимо, был невысоким, что и позволило сформировать структуру без хрупкой фазы на поверхности. Это подтверждается высокой стабильностью режущих кромок азотированных инструментов при нагрузках – никаких признаков отслаивания поверхностного слоя не наблюдалось.

Помимо увеличения срока службы, отмечены и изменения характера износа инструмента. У необработанных сверл из Р6М5 наблюдалось выраженное налипание материала на режущие кромки при сверлении вязких сплавов, приводящее к выкрашиванию кромки. У азотированных сверл налипание практически отсутствовало – ви-

димо, из-за более инертной, тугоплавкой нитридной поверхности с пониженным коэффициентом трения. Кроме того, износ задней грани азотированных инструментов протекал более равномерно, без глубоких задиров. По завершении испытаний азотированные инструменты сохранили правильную геометрию кромки, тогда как у обычных сверл часто наблюдалось ломание режущих уголков. Данный факт свидетельствует о повышении термостойкости и прочности режущей части после азотирования.

Следует отметить, что хотя азотирование и увеличивает твёрдость поверхности, чрезмерно толстый нитридный слой мог бы сделать кромку хрупкой. В проведенных экспериментах оптимальный слой был относительно тонким (~20–40 мкм) и не приводил к хрупкому разрушению. Однако литературные данные указывают: при высоком азотном потенциале образуется ϵ -фаза (Fe_3N) в виде корки, которая может отслаиваться в начале резания, ускоряя износ. Поэтому важна корректная настройка режима ИП-обработки – либо добавление водорода, либо пониженная концентрация активного азота, чтобы получить диффузионный слой с упрочняющими нитридами без сплошной корки. Именно такой слой (зона внутреннего азотирования с нитридами легирующих

элементов) обеспечивает наилучший результат по стойкости.

Выводы:

1. Ионно-плазменное азотирование является эффективным методом упрочнения быстрорежущего инструмента. На примере свёрл и фрез из стали Р6М5 показано, что короткая ионно-плазменная обработка (20 мин при 400–450 °C) повышает микротвёрдость поверхности ~с 730 HV до ~1000 HV, то есть примерно в 1,5 раза. В структуре азотированного слоя отсутствует сплошная нитридная корка, сформирован диффузионный градиентный слой толщиной порядка от 20 до 40 мкм с мартенситной матрицей, упрочнённой дисперсными нитридами Fe-N и Me-N.

2. Стойкость режущего инструмента из стали Р6М5 после ионно-плазменного азотирования значительно возрастает. В условиях сверления конструкционной стали ресурс сверла увеличился примерно в 2,5 раза, а при сверлении титанового сплава – в ~4 раза по сравнению с исходным инструментом. Азотирование предотвращает налипание материала на режущие кромки и уменьшает скорость износа задней поверхности, обеспечивая более плавное изнашивание без выкрашивания.

3. Сочетание азотирования с покрытиями представляется перспективным путём повышения стойкости инструмента из Р6М5. Ионно-азотированный слой служит прочной основой с сжимающими напряжениями для нанесения сверхтвёрдого покрытия, улучшая его адгезию и долговечность. По экспериментальным данным, комплексная обработка (азотирование + PVD-покрытие) позволяет увеличить стойкость инструмента на 20–50 % больше, чем одно покрытие. В дальнейшем предполагается экспериментально исследовать комбинированные схемы упрочнения для инструмента из Р6М5.

4. Ионно-плазменная обработка может быть рекомендована для повышения ресурса режущего инструмента сложной формы из быстрорежущих сталей (свёрла, метчики, фрезы), особенно работающего в условиях адгезионного износа и нагрева. Процесс ионного азотирования сравнительно недолог, протекает без перегрева и не требует последующей перешлифовки инструмента, так как сохраняет исходную геометрию и размеры. Применение стандартных нитридных покрытий на азотированную поверхность способно

ещё более повысить эффективность инструмента. Перспективным направлением является оптимизация режимов азотирования (с использованием регулируемого азотного потенциала) для получения наилучшего сочетания твёрдости и вязкости слоя, что в итоге обеспечит максимальное увеличение стойкости инструмента из сталей типа Р6М5.

ЛИТЕРАТУРА

1. О возможных механизмах атомного разупорядочения в бинарных сплавах / Андрухова О.В., Козлов Э.В., Дмитриев С.В., Старostenков М.Д. //Физика твердого тела – 1997. – Т. 39. – № 8. С. 1456-1460. EDN: RYMUND.
2. Нанесение покрытий и поверхностная модификация инструмента. / Григорьев С.Н., Волосова М.А. – Москва: ИЦ МГТУ «Станкин», Янус-К, 2007. 324 с. EDN: PELADV.
3. Модификация поверхности режущего инструмента из быстрорежущей стали путем вакуумно-плазменной обработки / Григорьев С.Н., Волосова М.А., Климов В.Н. // Физика и химия обработки материалов. 2005. № 5. С. 11–18. EDN: HSGNKZ.
4. Модификация структуры и свойств быстрорежущей стали путём комбинированной вакуумно-плазменной обработки / Григорьев С.Н., Метель А.С., Федоров С.В. // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2012. – № 1 (679). – С. 9-14.
5. Влияние плазменной обработки на структуру и свойства быстрорежущих сталей Р6М5 и S390 / Обидина О.В., Шеменков В.М., Липский А.Э., Маркидонов А.В., Старостенков М.Д. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2016. – Т. 3.– № 4. – С. 522-529.
6. Методы комплексной ионно-плазменной обработки режущего инструмента из стали Р6М5 / Яковлева С.С. // Достижения и перспективы научных исследований молодежи. Материалы XX студенческой конференции. Уфа. - Уфимский государственный авиационный технический университет, 2022. – С. 696-700.
7. Глубокое ионно-плазменное азотирование быстрорежущей стали Р6М5 / Ячменева А. Г., Климов В. Н., Алёшин С. В. // XXX Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС-2018). - Москва: Институт машиноведения РАН, 2019. С. 719–723.

УДК 004

Татарников Николай Николаевич, начальник бюро ИАСУ АО «Государственный Рязанский приборный завод», Tatarnicovn.n@yandex.ru, SPIN 1542-9325

Гришакина Ирина Викторовна, инженер-технолог АО «Государственный Рязанский приборный завод», IrinaGrisakina@yandex.ru

КЛЮЧЕВЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ОСОБЕННОСТИ ВНЕДРЕНИЯ САПР В РАМКАХ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ

Аннотация: в статье рассматриваются ключевые проблемы и особенности внедрения универсальной системы управления информацией *IPS Search* на предприятиях оборонно-промышленного комплекса. Анализируются преимущества и недостатки системы для обработки больших массивов данных при обеспечении требований информационной безопасности и защиты государственной тайны.

Ключевые слова: проблема, внедрение, импортозамещение, система автоматизированного проектирования (САПР), *IPS PLM*, *IPS PDM*.

Предприятия оборонно-промышленного комплекса являются флагманом отечественной промышленности, где сосредоточены уникальные разработки, критически важные технологии и информация, составляющая государственную тайну.

На современных ОПК при колоссальных объемах данных (Big Data) – эффективный поиск информации, анализ и использование конструкторской, технологической и другой документации крайне затруднителен. Данные разрознены, хранятся в разных форматах и в изолированных хранилищах. На решение этих проблем и направленно внедрение современных отечественных систем автоматизированного проектирования (САПР).

На данный момент импортозамещение зарубежных САПР в России включают в себя следующие трудности:

- ограниченные возможности и функциональность: Российские САПР зачастую уступают зарубежным аналогам по уровню развития, количеству поддерживаемых стандартов и интеграции с другими системами. Это затрудняет их использование в сложных и масштабных проектах;

- недостаточная зрелость и опыт внедрения: Многие отечественные решения находятся

на начальных этапах развития, что вызывает сложности при их внедрении и эксплуатации. Отсутствие широкого опыта использования ведет к рискам ошибок и снижению эффективности;

- ограниченная экосистема и поддержка: Зарубежные системы обладают развитой экосистемой разработчиков, обучающих программ, технической поддержки и сообществ пользователей. Российские аналоги часто страдают от недостатка таких ресурсов, что усложняет их распространение и использование.

- высокие требования к совместимости: Внедрение отечественных САПР требует адаптации существующих процессов и стандартов, что связано с затратами времени и ресурсов. Также возникают сложности при интеграции с международными стандартами и системами поставщиков;

- финансовые и инвестиционные ограничения: Разработка конкурентоспособных российских решений требует значительных инвестиций, а государственная поддержка не всегда достаточна или своевременна;

- культурные и организационные барьеры: Переключение на отечественные системы требует изменения бизнес-процессов, обучения персонала и преодоления сопротивления изменениям внутри организаций;

- геополитические факторы: Санкции и ограничения на экспорт технологий могут затруднить доступ к современным компонентам или программному обеспечению, необходимому для развития российских САПР.

Для успешного внедрения и импортозамещения необходимо комплексное развитие отечественных технологий, создание условий для их внедрения, а также активное сотрудничество между государством, промышленностью и научными учреждениями.

Проблемы импортозамещения *Solid Works* как одной из основных САПР на крупных предприятиях в России связаны с рядом факторов, которые затрудняют замену этого популярного зарубежного CAD-решения отечественными аналогами или альтернативами. Основные проблемы включают:

- высокий уровень функциональности и популярности: *SolidWorks* является одним из ведущих CAD-систем в мире благодаря богатому функционалу, удобству использования и широкой экосистеме. Создать отечественный продукт, способный полностью заменить его, сложно;

- недостаток аналогов с полной совместимостью: Российские системы часто не обеспечивают полного соответствия стандартам и форматам файлов *SolidWorks* (например,

SLDPRT, SLDASM), что усложняет миграцию данных и совместную работу;

- ограниченная зрелость отечественных решений: Российские CAD-системы для механического проектирования зачастую находятся на ранних стадиях развития, имеют меньшую функциональность и меньшую поддержку со стороны разработчиков;

- недостаточная интеграция и экосистема: В отличие от SolidWorks, отечественные системы имеют ограниченные возможности интеграции с другими инженерными программами, а также меньшую базу обучающих материалов и сообщество пользователей;

- высокие требования к обучению и адаптации персонала: Переключение на новые системы требует времени и ресурсов на обучение сотрудников, что может быть дорого и сложно реализуемо в краткосрочной перспективе;

- финансовые инвестиции: Разработка или приобретение отечественных решений требует значительных инвестиций, а их коммерческая привлекательность еще не достигла уровня зарубежных аналогов;

- лицензионные ограничения и патентные вопросы: Некоторые функции SolidWorks защищены патентами или требуют лицензий, что усложняет создание полностью совместимых отечественных решений;

- страхи потери эффективности: Компании опасаются снижения производительности из-за перехода на менее зрелые системы или необходимость адаптации рабочих процессов.

Для успешного импортозамещения SolidWorks необходимо развитие отечественных CAD-решений с учетом требований промышленности, создание условий для их внедрения.

Отечественные системы автоматизированного проектирования (САПР) зачастую имеют ряд инструментальных недостатков по сравнению с популярной зарубежной системой SolidWorks. Основные из них включают:

- ограниченная функциональность: Меньшее количество инструментов для сложного моделирования и анализа;

- недостаточные возможности для автоматизации проектных процессов;

- ограниченные средства для работы с большими сборками и сложными геометриями;

- недостаточная интеграция с другими системами: Ограниченнная поддержка стандартных форматов файлов (например, SLDPRT, SLDASM);

- меньшее число интеграций с САМ, САЕ, PDM-системами и другими инженерными приложениями.

- меньший набор инструментов для анализа и симуляции: Ограниченные возможности для проведения механического, теплового или динамического анализа;

- отсутствие или слабая развитость модулей для оптимизации конструкции;

- ограниченные средства автоматизации и скрипtingа: Меньшее количество встроенных макросов, API и возможностей для автоматизации повторяющихся задач;

- недостаточная гибкость в настройке пользовательских интерфейсов;

- меньшая поддержка современных технологий: Недостаточная интеграция с облачными сервисами;

- ограниченные возможности для совместной работы в реальном времени;

- пользовательский интерфейс и удобство использования: Менее интуитивный интерфейс по сравнению с SolidWorks;

- меньшая адаптивность под разные типы проектов и пользователей;

- ограниченная документация и обучающие материалы: Меньшее сообщество пользователей;

- недостаток обучающих курсов, форумов и технической поддержки.

Эти недостатки затрудняют использование отечественных САПР в условиях высокой конкуренции с SolidWorks, особенно в сложных инженерных задачах, требующих широкого набора инструментов и высокой производительности. Для повышения конкурентоспособности отечественных решений необходимо развитие их функциональности, улучшение интерфейса и расширение экосистемы поддержки.

Стартовое окно SolidWorks представлено на рисунке 1.

Решить данные проблемы можно с помощью внедрения универсальной системы управления информацией IPS Search, разработанной компанией «ИНТЕРМЕХ».

На рисунке 2 изображено стартовое окно IPS Search.

Современное изделие – это совокупность механической, электротехнической и программной частей, поэтому при его проектировании используется целый спектр инженерных систем. В результате их работы должно быть сформировано единое точное описание изделия, основанное на соответствующих электронных представлениях.

Программный комплекс IPS имеет модульную структуру (рис.3) и обеспечивает высокоеэффективное управление данными на всех этапах

разработки документации, подготовки производства, выпуска и эксплуатации.

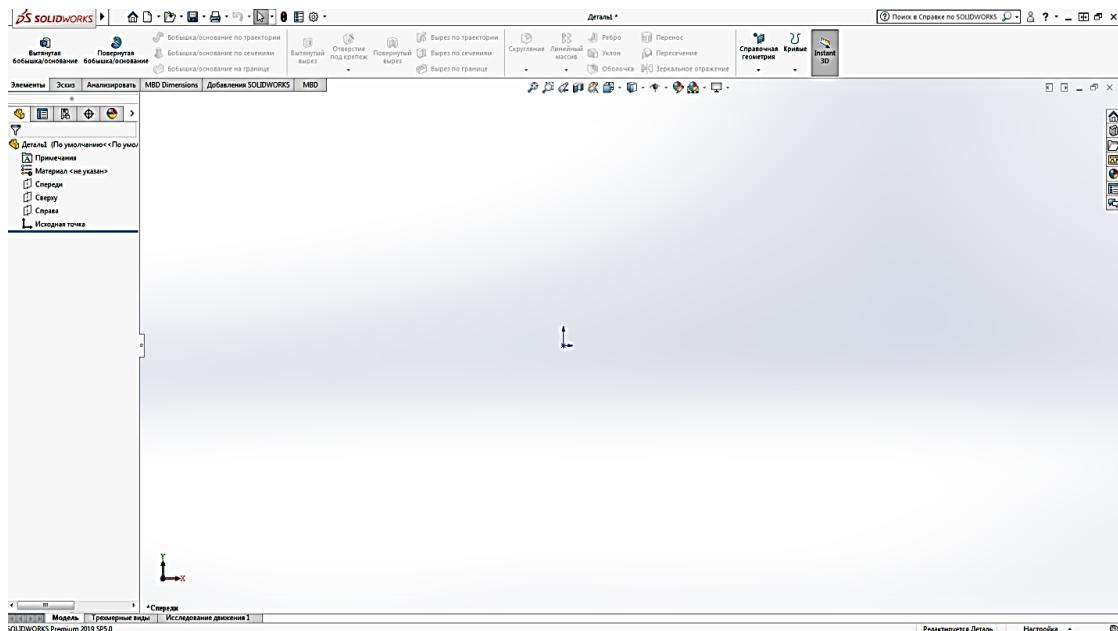


Рисунок 1 – Стартовое окно SolidWorks

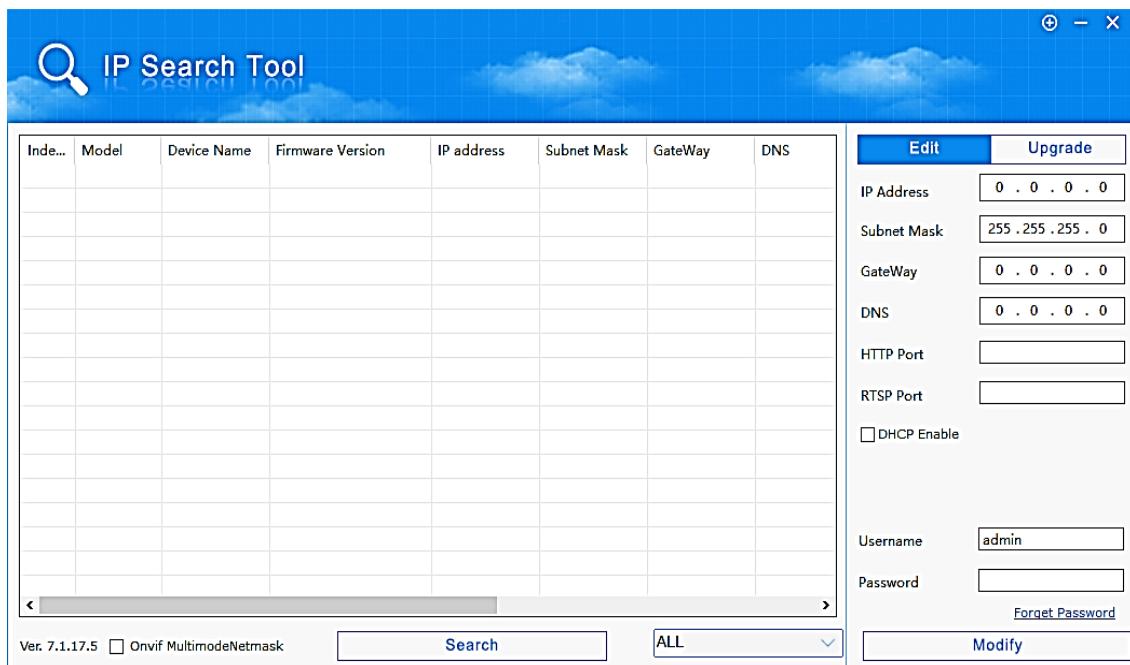


Рисунок 2 – Стартовое окно IPS Search



Рисунок 3 – Модульная структура программного комплекса IPS

Одной из ключевых особенностей IPS Search является IPS PLM (Product Lifecycle Management) – полномасштабная платформа для управления жизненным циклом изделия. [2], [3] Она дает возможность построить полный цифровой макет изделия, используя разнородные среды проектирования. На сегодняшний день можно с уверенностью сказать, что из всех отечественных PLM-систем IPS обладает самым большим количеством интеграторов с механическими и электрическими системами автоматизированного проектирования: AutoCAD, BricsCAD, Компас-График, КОМПАС-3D, Inventor, NX, Creo, SOLIDWORKS, SolidEdge, CATIA, Altium Designer, Mentor Graphics, E3.series.

В комплект поставки IPS входит универсальный модуль интеграции систем трёхмерного проектирования с PLM-системами CAD/ECAD Connectors. Модуль встраивается в интерфейс CAD-системы и предоставляет конструктору доступ к функциям PLM непосредственно из системы проектирования. Модуль обеспечивает автоматическое считывание состава изделий из моделей сборочных единиц, генерацию по моделям конструкторских спецификаций, а также ассоциативную связь между свойствами моделей и атрибутами документов и изделий в PLM-системе. Также этот модуль позволяет организовать коллективную работу конструкторов над моделированием сложных сборок, предоставляя набор функций для синхронизации изменений, сделанных различными конструкторами в моделях, входящих в состав головной сборки.

IPS CAD Connectors является мостом между PLM-системой и соответствующей CAD-системой.

Интеграция с CAD-системами позволяет быстро произвести первичный ввод деталей и сборок в IPS. При занесении сборки IPS Search разворачивает ее состав, строит дерево зависимостей, определяет для каждого компонента сборки требуемый тип документа и набор атрибутов. Собранный пакет данных заносится в IPS Search с минимальным участием пользователя. В том случае, когда невозможно определить по расширению файла, какой это тип документа (например, Siemens PLM Software NX, где чертеж, сборка и деталь имеют расширение prt), IPS Search использует косвенные признаки (наличие состава, чертежных видов и т.д.).

В состав платформы IPS PLM входит модуль системы управления всеми конструкторско-технологическими данными - IPS PDM (Product Data Management). [4]

IPS PDM выполняет роль системы импортозамещения SolidWorks:

- локальная разработка и поддержка: IPS PDM входит в Единый реестр российского ПО, что обеспечивает независимость от иностранных поставщиков программного обеспечения и минимизирует риски, связанные с санкциями или ограничениями на импорт;

- функциональность: IPS PDM обладает глубокой интеграцией с российскими (КОМПАС-3D, Лоцман: PLM) и зарубежными (SOLIDWORKS, Inventor, CATIA и др.) CAD-приложениями. Все файлы (3D-модели, чертежи, спецификации, техпроцессы и другие документы) собраны в едином защищенном хранилище с автоматическим поддержанием связей между ними. Данная система хранения позволяет увидеть всю историю изменений каждого изделия;

- безопасность и контроль данных: все данные хранятся на российских серверах, а доступ к ним регулируется в соответствии с требованиями федерального законодательства;

- IPS PDM поддерживает требования ЕСКД, СПДС и других стандартов;

- снижение затрат на внедрение и поддержку: по сравнению с зарубежными аналогами, IPS PDM предлагает более гибкую политику и локализованную поддержку.

Несмотря на преимущества IPS PDM как системы импортозамещения SolidWorks, у него есть ряд недостатков по сравнению с оригинальной зарубежной платформой.

Основные из них:

1. Интеграция и неудобство работы с CAD-средой:

В SolidWorks инженер работает в одной среде – все действия (извлечение файлов, сохранение, просмотр версий, изменение состояния и пр.) происходят мгновенно и интуитивно понятно, без переключения между окнами, в то время как в IPS PDM, интеграция с CAD-системами в основном осуществляется через add-ons (надстройки). Надстройки приводят к замедлению скорости и удобства работы.

2. Обучение и документация:

Обучающие материалы для SolidWorks более обширны и доступны на разных языках. Для IPS PDM зачастую требуется обращаться к российским источникам или специалистам, что может усложнить обучение новых сотрудников.

3. Международное признание и стандарты:

SolidWorks широко используется в международных компаниях и соответствует глобальным стандартам проектирования. IPS PDM ориентирован преимущественно на российский

рынок, что может влиять на совместимость с международными проектами. [5] Основные этапы внедрения IPS Search показаны на схеме (рис. 4):



Рисунок 4 – схема основных этапов внедрения IPS Search на ОПК

1. Предпроектный. Этап, целью которого является получить полное понимание текущей ситуации, сформировать цели и план проекта;
2. Проектирование и настройка. На этом этапе формируется техническое задание и настраивается система;
3. Пилотное внедрение. Важный этап нужный для проверки работы системы, выявления ошибок и обучения первой группы пользователей;
4. Промышленная эксплуатация. Этап, на котором подключают всех пользователей, то есть осуществляется полномасштабный переход на новую систему;
5. Эксплуатация и развитие. Завершающий этап, целью которого является подведение итогов внедрения, а также передача системы на постоянную техническую поддержку.

Успешными примерами внедрения IPS Search в России являются такие компании, как «Росатом», «Роскосмос», «Вертолеты России» и другие гиганты отечественной промышленности. Своими успешными результатами внедрения поделились ПАО «Ил»:

- сократилось время на поиск и согласование документов на 40%;
- повысилась актуальность данных, и исключились использование устаревших версий чертежей;
- настроилось сквозные процессы взаимодействия между конструкторскими и технологическими службами.

Данная система связывает между собой все подразделения: от конструкторского бюро и технологических служб до цехов и отдела снабжения, что положительно сказывается на работе всего предприятия.

IPS Search предлагает надежность, безопасность и полное соответствие требованиям российских стандартов, делая ее идеальным выбором

для современных промышленных компаний. IPS PDM является проверенным и эффективным вариантом, подтвердившим свою пользу в реальных проектах.

Внедрение комплекса IPS Search, IPS PLM и IPS PDM на предприятиях оборонно-промышленного комплекса – стратегическая необходимость для обеспечения обороноспособности страны, конкурентоспособности в условиях санкций и глобальных изменений на рынке, сохранности технологического суверенитета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Есенин Д.К. Исследование и разработка управляющих программ для обработки деталей в CAD, CAM системе / В книге: Новые технологии в учебном процессе и производстве. Материалы XXI Международной научно-технической конференции, посвященной 35-летию полета орбитального корабля-ракетоплана многоразовой транспортной космической системы «Буран». Под редакцией А.Н. Паршина. – Рязань, 2023. – 456-457 с.
2. Шептунов И. Разработка и внедрение PDM/PLM-системы с элементами MRP на платформе IPS Search в АО «РЭД» / САПР и графика. 2024. № 6 (334). – 62-64 с.
3. Татарников Н.Н., Белеблюбский Б.Ф. Стратегии высокоскоростной обработки CAM системе / В сборнике: Машиноведение и инновации. Конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС-2017). Материалы конференции. 2018. – 33-35 с.
4. Фадеева А. Новые возможности IPS 6.0 часть 1 / САПР графика. 2020. № 5 (283). – 22-26 с.
5. Золотаревич В.П. Использование инженерных знаний при внедрении PLM систем на предприятиях/Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах. 2015. Т. 1. – 165 -168 с.

УДК 658.5

Чевакин Иван Юрьевич, студент РИ(ф)МПУ,
aa777aab2@yandex.ru

Зинакова Светлана Эдуардовна, студент
РИ(ф)МПУ, aa777aab2@yandex.ru

КОНЦЕПЦИЯ АВТОНОМНОГО ЗАВОДА В РОССИЙСКОМ МАШИНОСТРОЕНИИ: ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ, ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ

Аннотация: статья посвящена комплексному анализу концепции автономного завода как ключевого вектора трансформации российского машиностроительного комплекса в условиях Четвертой промышленной революции. Рассматриваются технологические основы (Индустрия 4.0), включая искусственный интеллект (ИИ), цифровые двойники и аддитивные технологии. Выявляются системные вызовы, связанные с технологическим отставанием, кадровым дефицитом, кибербезопасностью и необходимостью адаптации зарубежных моделей к российским реалиям. На основе анализа государственных программ и корпоративных стратегий определяются стратегические перспективы внедрения автономных производств, делается вывод о эволюционном, а не революционном пути развития с акцентом на пилотные проекты в сегментах ОПК и высокотехнологичного машиностроения.

Ключевые слова: Индустрия 4.0, российское машиностроение, цифровая трансформация, искусственный интеллект, цифровой двойник.

Глобальный тренд на цифровизацию промышленности, известный как Индустрия 4.0, трансформирует традиционные производственные парадигмы, выводя на первый план концепцию «завода будущего» или «автономного завода». Под автономным заводом понимается киберфизическая производственная система, способная к самооптимизации, самоорганизации и адаптации в режиме, близком к реальному времени, на основе данных, получаемых от взаимосвязанных устройств и анализируемых с помощью алгоритмов искусственного интеллекта. Для российского машиностроения, которое сталкивается с необходимостью преодоления технологического отставания, импортозамещения и повышения глобальной конкурентоспособно-

сти, внедрение элементов автономного производства становится не просто опцией, а стратегической необходимостью.

Особую значимость эта тема приобретает в контексте острой демографической проблемы. Согласно данным Росстата за 2023 год, суммарный коэффициент рождаемости в России составил 1,42, что существенно ниже показателя простого воспроизводства населения (2,1) [1]. Следствием этого является неуклонное сокращение численности экономически активного населения и нарастающий дефицит квалифицированных кадров, включая рабочих и инженеров машиностроительных специальностей. В этих условиях переход к автономным, малоучастным и высокопроизводительным производствам становится критическим инструментом компенсации демографического дисбаланса и обеспечения устойчивого развития промышленности.

Актуальность темы подтверждается ее центральным местом в ключевых государственных документах, таких как национальный проект «Производительность труда» [2] и стратегия «Цифровая трансформация промышленности до 2030 года» [3].

Цель данной статьи – провести детальный анализ технологических основ, системных вызовов и стратегических перспектив реализации концепции автономного завода в контексте специфики российского машиностроительного комплекса.

Концепция автономного завода, представляющего собой киберфизическую производственную систему, способную к самооптимизации и адаптации в режиме, близком к реальному времени, базируется на конвергенции нескольких сквозных цифровых технологий, образующих единый цифровой контур управления.

Основой этого контура является Промышленный интернет вещей (ПоТ) и сенсорика, которые обеспечивают сбор данных. ПоТ (от англ. Industrial Internet of Things - Промышленный интернет вещей) представляет собой специализированную сеть взаимосвязанных промышленных устройств, оснащенных встроенными датчиками и программным обеспечением для сбора, обмена и анализа данных в режиме реального времени с целью оптимизации производственных процессов. Внедрение ПоТ подразумевает оснащение станков, роботов и конвейерных линий датчиками, непрерывно передающими информацию о состоянии оборудования и параметрах технологического процесса. Однако, как показывает отчет Аналитического центра при Правительстве РФ за 2023 год (рис.1), уровень оснащенности

российских промышленных предприятий IoT-решениями оценивается лишь в %, что указывает на начальный этап этого пути [4].

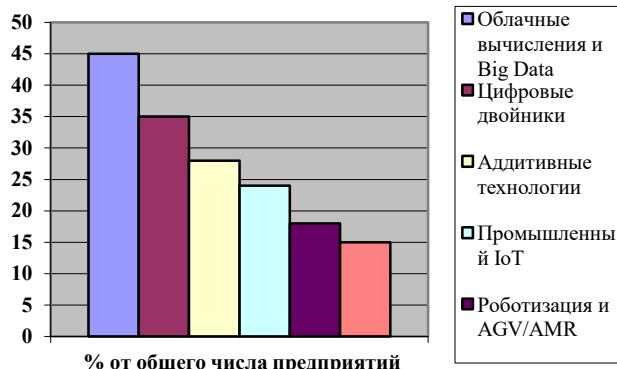


Рисунок 1 – Уровень внедрения ключевых технологий Индустрии 4.0 на машиностроительных предприятиях России в 2023 году, % от общего числа предприятий

Как видно из диаграммы, наибольшее распространение получили облачные вычисления и системы Big Data, что связано с относительной зрелостью этих решений на рынке. В то же время, такие критически важные для автономности технологии, как промышленный IoT и роботизация, внедрены менее чем на четверти предприятий, что указывает на значительный разрыв между цифровизацией бизнес-процессов и физической автоматизацией производства.

Собранные терабайты данных бессмысленны без аналитики, что закономерно подводит нас к следующему технологическому столпу – Большим данным (Big Data) и искусственному интеллекту. Алгоритмы машинного обучения используются для прогнозного обслуживания, позволяя предсказывать отказы оборудования с точностью до 95%, что, по данным корпорации «КАМАЗ» за 2024 год, позволило сократить количество внеплановых остановок главного сборочного конвейера на 18% [5].

Неотъемлемой частью этой цифровой экосистемы являются Цифровые двойники – виртуальные копии физических активов или процессов. Они позволяют проводить виртуальные испытания и оптимизировать конструкцию до начала физического производства, радикально сокращая цикл НИОКР. По оценкам экспертов НИУ ВШЭ (2023), использование цифровых двойников может снизить стоимость прототипирования в машиностроении на 25-40% [6].

Логическим развитием гибкости производства являются Аддитивные технологии (3D-печать), позволяющие создавать сложные детали по цифровым моделям без оснастки. В России данный сегмент развивается активно, хотя, согласно

отчету Ассоциации «АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» (2024), его доля в общем объеме машиностроительного производства пока не превышает 0,5% [7]. Завершает этот технологический ансамбль Роботизация и автономные транспортные системы (AGV/AMR). Здесь Россия демонстрирует значительное отставание: около 5 роботов на 10 000 сотрудников против 200-300 в Германии или Южной Корее (данные IFR за 2023 год), что, однако, указывает на огромный потенциал для роста в условиях дефицита рабочей силы [8].

Несмотря на очевидный технологический потенциал и демографическую обусловленность, переход к автономному заводу в России сопряжен с рядом системных вызовов, носящих комплексный характер.

Первым и наиболее острым барьером является технологическая зависимость и проблемы импортозамещения. Санкционное давление 2022-2024 годов обострило проблему зависимости от импорта критически важного программного обеспечения и промышленного оборудования. Хотя российские разработчики активно развиваются свои продукты, их функционал и экосистема интеграций часто все еще уступают зарубежным аналогам, а надежность отечественных контроллеров и датчиков находится на стадии активной доводки. Эта технологическая уязвимость напрямую связана со следующим вызовом – Кадровым дефицитом.

Парадоксально, но создание автономных, малоучастных производств требует принципиально новых, высококвалифицированных кадров: data scientist-ов, инженеров по кибербезопасности, специалистов по ИТ. Опрос Союза машиностроителей России (2023) показал, что 78% предприятий испытывают острую нехватку таких специалистов [9], что создает «цифровой парадокс»: нехватка людей тормозит создание производств, призванных компенсировать нехватку людей.

Третьим фундаментальным барьером выступают инвестиционные затраты и неочевидность ROI (от англ. Return on Investment – «возврат на инвестиции»). Структура затрат на подобный проект, представленная на Рисунке 2, демонстрирует, что основные инвестиции приходятся не на закупку собственно оборудования, а на сопутствующие цифровые решения и интеграцию, что часто недооценивается при планировании.

Для многих машиностроительных предприятий, работающих с рентабельностью в 6-8% (данные Минпромторга на 2023 год) [3], быстрая окупаемость многомиллионных инвестиций

в автономизацию остается под большим вопросом, требуя тщательного технико-экономического обоснования и поэтапного подхода.

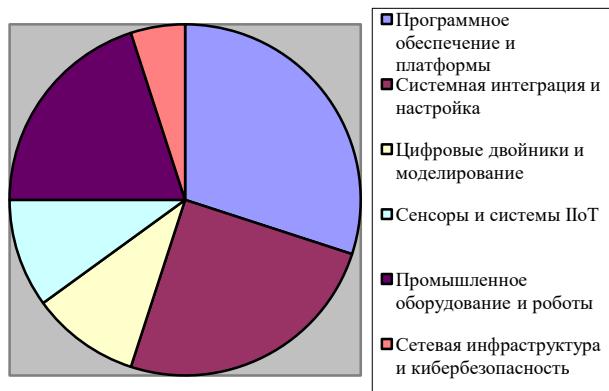


Рисунок 2 – Примерная структура капитальных затрат (CAPEX) при создании автономной производственной линии в российском машиностроении, %

Также следует учесть, что высокая степень связанности делает автономный завод крайне уязвимым для кибератак. По данным компании «Киберпротект» (2023), в 2023 году инциденты с вредоносным ПО были зафиксированы на 42% промышленных предприятий, что превращает кибербезопасность из технической задачи в условие выживания [10]. Особую сложность представляет обеспечение кибербезопасности в условиях интеграции legacy-систем с новыми цифровыми платформами. Традиционные промышленные сети, изначально спроектированные как изолированные, при подключении к IoT-платформам становятся уязвимыми для целенаправленных атак. По данным [11], в 2023 году 67% успешных кибератак на промышленные предприятия были направлены именно на стыки между старыми и новыми системами.

Наконец, важным вопросом при реализации концепции автономного завода является учет региональной специфики российского машиностроения. Анализ показывает значительную дифференциацию в технологической готовности регионов к подобной трансформации. Ключевые индустриальные центры - Москва, Санкт-Петербург, Татарстан, Свердловская и Калужская области - демонстрируют наибольшую активность во внедрении элементов Индустрии 4.0. Однако в регионах с исторически сложившейся специализацией на тяжелом машиностроении (Урал, Сибирь) наблюдается значительное отставание, обусловленное как высокой капиталоемкостью модернизации, так и дефицитом кадров. При этом именно

эти регионы обладают наибольшим потенциалом для создания комплексных автономных производственных кластеров благодаря наличию полного цикла производства и развитой научной базы. Для преодоления регионального неравенства необходима разработка дифференцированной государственной политики, учитывающей специализацию и технологический уровень каждого региона.

Учитывая комплексность вызовов, стратегические перспективы реализации концепции автономного завода в России видятся не в революционном скачке, а в последовательном эволюционном движении.

Наиболее реалистичным представляется поэтапный переход, начинающийся с создания «точек роста» – цифровых цехов или линий, где отрабатываются технологии и бизнес-процессы, как это было сделано на «Цифровом заводе» Холдинга «Вертолеты России». Приоритет следует отдавать проектам с быстрым экономическим эффектом, таким как внедрение систем предиктивного обслуживания, которые демонстрируют понятную и измеримую отдачу [11]. Ключевую роль в этом процессе должен играть государство как катализатор преобразований через механизмы национальных проектов [2], субсидирование кредитов и создание инжиниринговых центров коллективного пользования, подобных Центру компетенций НТИ на базе МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Критическим фактором успеха становится формирование новой генерации инженерных кадров. Как показывает практика ведущих машиностроительных холдингов, традиционная система подготовки специалистов не успевает за скоростью технологических изменений. Решением становится создание корпоративных образовательных центров и партнерство с ведущими техническими вузами. Например, в рамках сотрудничества Ростеха с МГТУ им. Баумана и СПбПУ Петра Великого разработаны специализированные магистерские программы по направлениям "Цифровое проектирование" и "Умное производство". Особенностью таких программ является интеграция реальных производственных задач в учебный процесс - до 70% занятий проводятся на площадках предприятий. Результатом становится не только подготовка квалифицированных кадров, но и создание кадрового резерва для реализации конкретных проектов цифровой трансформации.

В среднесрочной перспективе наиболее вероятными пионерами в создании полноценных автономных заводов станут предприятия оборонно-

промышленного комплекса (ОПК), где требования к качеству, сложности и срокам исполнения заказов максимальны, а демографическое давление на кадры сочетается с высочайшими требованиями к их квалификации. Успешный опыт, отработанный в ОПК, впоследствии может быть тиражирован на гражданские сектора машиностроения, такие как автомобилестроение и энергетическое машиностроение, позволяя не только удовлетворить внутренний спрос, но и вывести на мировой рынок конкурентоспособную продукцию с высокой добавленной стоимостью.

В условиях текущих геополитических вызовов особую актуальность приобретает формирование замкнутой экосистемы технологического суверенитета. Как демонстрирует Таблица 1, российская промышленность обладает значительным потенциалом для импортозамещения критически важных компонентов автономных производств.

Таблица 1 – Потенциал импортозамещения компонентов автономного завода в России

Технологический сегмент	Текущая доля российских решений, %	Потенциал роста к 2030 г., %
Промышленное ПО	35	75
Системы аналитики и ИИ	28	70
Промышленные роботы	15	50
Сенсоры и датчики ПоТ	12	65
Цифровые двойники	25	80

Особое значение в контексте формирования технологического суверенитета приобретает развитие отечественной компонентной базы для систем ПоТ и робототехники. Как показывают данные отраслевого анализа, текущий уровень локализации производства микроконтроллеров и специализированных сенсоров не превышает 8–10%, что создает критические риски для устойчивости автономных производственных систем. Для преодоления этой зависимости необходима реализация скоординированной программы развития микроэлектроники и приборостроения, включающей создание специализированных производственных линий и разработку отечественных архитектур промышленных контроллеров. Успешное решение этой задачи позволит не только обеспечить технологическую независимость, но и создаст основу для экспорта российских решений в области промышленной автоматизации на рынки стран БРИКС и ЕАЭС.

Таким образом можно сделать вывод, что концепция автономного завода представляет собой стратегическую цель цифровой трансформации российского машиностроения, приобретающую особое значение в контексте преодоления демографического кризиса и струк-

Наиболее успешно развиваются отечественные решения в области промышленного ПО и систем аналитики, где доля российских продуктов достигает 35%. В то же время сегмент робототехники и сенсоров требует ускоренного развития, поскольку текущий уровень импортозамещения не превышает 15%. Ключевым элементом экосистемы должны стать отраслевые интеграционные платформы, обеспечивающие совместимость решений различных отечественных производителей. Реализация представленных в таблице ориентиров потребует координации усилий государства, бизнеса и научного сообщества. Особое внимание следует уделить созданию механизмов опережающего финансирования перспективных разработок и формированию системы технических стандартов, обеспечивающих совместимость компонентов автономного завода.

турного дефицита трудовых ресурсов. Ее технологической основой являются интернет вещей, искусственный интеллект, цифровые двойники и аддитивные технологии, уровень внедрения которых в отрасли пока отстает от мировых лидеров, но демонстрирует положительную динамику. Основными барьерами выступают технологическая зависимость, кадровый дефицит, высокие инвестиционные затраты и риски кибербезопасности. Стратегические перспективы связаны с реализацией эволюционного сценария, при котором государственная поддержка и пилотные проекты в приоритетных секторах, прежде всего в ОПК, создадут основу для последующего широкомасштабного распространения практик Индустрии 4.0. Успех данной трансформации определит не только технологический суверенитет, но и демографическую устойчивость российского машиностроения в долгосрочной перспективе, доказав, что высокая производительность может быть достигнута не только количеством рук, но и силой интеллекта и уровнем технологий.

ЛИТЕРАТУРА

- Демографический прогноз Российской Федерации на период до 2035 года / Федеральная служба государственной статистики (Росстат). –

- Москва, 2023. – URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/12781> (дата обращения: 02.09.2025).
2. Национальный проект «Производительность труда»: официальный сайт. – URL: <https://производительность.рф> (дата обращения: 02.09.2025).
3. Стратегия цифровой трансформации промышленности Российской Федерации до 2030 года: утв. Приказом Минпромторга России от 25.11.2021 № 4793. – URL: <https://minpromtorg.gov.ru/docs/#1> (дата обращения: 12.05.2024).
4. Цифровая трансформация промышленности России: тенденции и вызовы: аналитический отчет / Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации. – Москва, 2023. – 68 с.
5. Годовой отчет ПАО «КАМАЗ» за 2023 год / ПАО «КАМАЗ». – Набережные Челны, 2024. – 120 с.
6. Цифровые двойники в промышленности: мировой опыт и перспективы в России / науч. ред. А. В. Филиппович; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – Москва: Изд. дом ВШЭ, 2023. – 154 с.
7. Обзор рынка аддитивных технологий в России за 2023 год / Ассоциация «АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ». – Москва, 2024. – 45 с.
8. World Robotics Report 2023: Industrial Robots / International Federation of Robotics (IFR). – Frankfurt am Main, 2023. – URL: <https://ifr.org/worldrobotics/> (дата обращения: 02.09.2025).
9. Исследование кадровых потребностей машиностроительной отрасли в условиях цифровизации / Союз машиностроителей России // Инженерная газета. – 2023. – № 4. – С. 12–15.
10. Отчет о кибербезопасности в промышленности за 2023 год / ООО «Киберпротект». – Москва, 2024. – URL: <https://cyberprotect.ru/reports/> (дата обращения: 02.09.2025).
11. Отчет о реализации проекта «Цифровой завод» / Холдинг «Вертолеты России». – Москва, 2024. – URL: <https://www.rhc.aero/> (дата обращения: 02.09.2025).

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 338.45:621

Кирьяков Олег Владислович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Машиностроение, энергетика и автомобильный транспорт» РИ(ф)МПУ, Olegkir1971@gmail.com, SPIN 9440-0579

Токарев Андрей Олегович, доцент, доцент кафедры «Машиностроение, энергетика и автомобильный транспорт» РИ(ф)МПУ, Olegkir1971@gmail.com

Юдаев Юрий Алексеевич, д-р техн. наук, профессор кафедры «Машиностроение, энергетика и автомобильный транспорт» РИ(ф)МПУ, yu.yudaev@mail.ru, SPIN 6293-0029

Кирьяков Андрей Олегович, студент РИ(ф)МПУ, Olegkir1971@gmail.com

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Аннотация: Электроэнергетика — одна из ключевых отраслей мировой экономики, обеспечивающая энергетическую основу для промышленности, транспорта, жилищно-коммунального хозяйства и цифровой инфраструктуры. В условиях глобальных вызовов, таких как изменение климата, рост энергопотребления и технологические трансформации, электроэнергетика переживает глубокую структурную и технологическую модернизацию. В данной статье рассматриваются основные современные тенденции развития электроэнергетики: переход на возобновляемые источники энергии (ВИЭ), цифровизация энергосистем, развитие распределённой генерации и микросетей, интеграция систем хранения энергии, а также формирование «умных» сетей (Smart Grids). Особое внимание уделяется роли государственной политики, международного сотрудничества и инвестиций в обеспечении устойчивого и надёжного энергетического будущего. Статья основана на анализе актуальных исследований, статистических данных и стратегических документов ведущих энергетических организаций.

Ключевые слова: Электроэнергетика, цифровая инфраструктура, технологическая

трансформация, возобновляемые источники энергии, «умные» сети.

Современная электроэнергетика находится в состоянии поиска новых решений. С одной стороны, она сталкивается с необходимостью обеспечивать растущий спрос на электроэнергию. По прогнозам Международного энергетического агентства (МЭА) к 2050 году глобальное потребление электроэнергии может удвоиться. С другой стороны, перед отраслью стоит задача декарбонизации, т.е. сокращение выбросов парниковых газов в соответствии с Парижским соглашением. Это требует радикального пересмотра структуры генерации.

Цифровая трансформация, развитие электромобильности и новые модели потребления энергии формируют новую цель функционирования энергосистем.

Одной из наиболее значимых достижений последнего времени является ускоренный переход к возобновляемым источникам энергии – солнечной, ветровой, гидро и биоэнергетике.

По данным МЭА, в 2023 году более 90% прироста установленной мощности в мире пришлось на возобновляемые источники энергии. Особенно динамично развивается солнечная энергетика. Стоимость фотоэлектрических модулей за последние 10 лет снизилась более чем на 80%, что сделало солнечную генерацию конкурентоспособной даже без субсидий, рис.1.



Рисунок 1 – Солнечная электростанция «Петрово», Республика Крым общая мощность 105,56 МВт, площадь 2 00 га

Ветроэнергетика также демонстрирует устойчивый рост, особенно в морском секторе (оффшорная ветроэнергетика), где мощность

новых установок увеличивается благодаря технологическим прорывам в конструкции турбин и снижению стоимости жизненного цикла проектов, рис. 2.

Однако интеграция ВИЭ в существующие энергосистемы сопряжена с трудностями: непостоянство и непредсказуемость выработки требуют гибкости сети, резервных мощностей и новых механизмов балансировки.



Рисунок 2 – Ветрогенераторы в Балтийском море

Геотермальные электростанции (ГеоЕС) – это возобновляемый источник энергии, использующий тепло Земли для выработки электричества, рис. 3.

Несмотря на экологичность и устойчивость, они сталкиваются с рядом технических, экономических, геологических и экологических проблем.

Геотермальная энергия доступна только в регионах с высокой геотермальной активностью (вулканические зоны, разломы земной коры).



Рисунок 3 – Геотермальная электростанция Несьявеллир, Исландия

В большинстве стран строительство геотермальных электростанций экономически нецелесообразно из-за низкой температуры недр.

Бурение глубоких скважин (до нескольких километров) – дорогстоящий процесс, причем стоимость разведки и бурения может составлять до 50–70 % от общей стоимости проекта.

Коррозия и эрозия оборудования из-за агрессивных химических веществ в геотермальной жидкости (сероводород, хлориды и др.). Происходит образование накипи и отложений в трубах и теплообменниках.

Происходят выбросы парниковых газов и хотя их значительно меньше, чем у ТЭС, но возможны выбросы CO₂, H₂S и других газов.

Загрязнение подземных вод: при неправильной эксплуатации возможны утечки токсичных веществ.

Следует отметить низкий КПД который у геотермальных электростанций обычно составляет 10–20 %, что ниже, чем у традиционных ТЭС или ГЭС.

Несмотря на перечисленные проблемы, геотермальная энергетика остаётся перспективным направлением, особенно в подходящих для этого регионах. Современные технологии (например, бинарные циклы, EGS) позволяют частично преодолеть эти ограничения, делая геотермальную энергию более доступной и безопасной.

Цифровизация становится катализатором трансформации электроэнергетики. Smart Grids – интеллектуальные энергосети позволяют в реальном времени управлять потоками энергии, оптимизировать нагрузку, повышать надёжность и снижать потери. Использование IoT-устройств, датчиков, систем мониторинга и аналитики больших данных позволяет операторам сетей принимать оптимальные решения.

Ключевыми компонентами интеллектуальных сетей являются:

- автоматизированные системы управления распределением (АСУР);
- интеллектуальные счётчики (smart meters);
- платформы для прогнозирования спроса и предложения;
- двусторонняя коммуникация между потребителем и сетью.

Цифровизация способствует развитию гибких рынков, на которых потребители могут участвовать в балансировке сети посредством управления спросом (demand response).

Традиционная централизованная модель энергоснабжения, основанная на крупных электростанциях и протяжённых линиях электропередачи, постепенно дополняется децентрализованными решениями. Распределённая генерация – это локальное производство электроэнергии вблизи места потребления (например, солнечные панели на крышах домов, малые ветряные установки и т.п.).

Автономные или полузависимые энергосистемы (microgrids), способные работать как в составе общей сети, так и самостоятельно. Они становятся всё более популярными, особенно в отдалённых регионах, на критически важных объектах (больницах, военных базах). Эти энергосистемы повышают устойчивость энергоснабжения, снижают зависимость от централизованных поставок и способствуют локальной энергетической независимости.

Одним из важных элементов современной электроэнергетики это сохранение энергии.

Интеграция возобновляемых источников энергии невозможна без эффективных систем хранения энергии (СХЭ). Аккумулирующие технологии, особенно на основе литий-ионных батарей, за последние годы значительно продвинулись вперёд. Снижение стоимости, увеличение плотности энергии и срока службы делают СХЭ экономически привлекательными как для промышленного, так и для бытового использования.

Помимо электрохимических решений, развиваются и другие технологии: насосные гидроаккумулирующие станции (ГАЭС), использование сжатого воздуха, хранение водорода, гравитационные, рис. 4.



Рисунок 4 – Гравитационное накопление энергии

Рост парка электромобилей (ЭМ) открывает новые возможности и ставит новые задачи перед электроэнергетикой. С одной стороны, массовое подключение ЭМ к сети может привести к пиковым нагрузкам. С другой стороны, ЭМ могут выступать в роли мобильных накопителей энергии через технологию V2G (vehicle-to-grid), отдавая энергию обратно в сеть в часы пик.

Это открывает путь к формированию «мобильных аккумуляторных парков», способных участвовать в балансировке энергосистемы.

Успешная трансформация электроэнергетики невозможна без поддержки со стороны

государства. Необходимы чёткие нормативные рамки, долгосрочные стратегии декарбонизации, механизмы стимулирования инвестиций в возобновляемые источники энергии и инфраструктуру, а также реформы рынков электроэнергии. Примерами эффективной политики являются «Зелёный курс» ЕС, национальные планы по достижению углеродной нейтральности (например, Китай к 2060 году, ЕС – к 2050 году) и программы субсидирования «умных» технологий.

Международное сотрудничество также играет ключевую роль: обмен технологиями, гармонизация стандартов, совместные исследования и инвестиционные проекты (например, в рамках МЭА, Всемирного банка, МАГАТЭ) способствуют ускорению глобального энергетического перехода.

Несмотря на позитивные тенденции, отрасль сталкивается с рядом рисков:

- институциональная инерция: устаревшие модели регулирования и монопольные структуры замедляют внедрение инноваций.

- кибербезопасность: цифровизация повышает уязвимость энергосистем перед кибератаками.

- сырьевые ограничения: для производства аккумуляторов и оборудования для ВИЭ требуются редкоземельные металлы, что создаёт geopolитические и экологические риски.

- социальная справедливость: энергетический переход должен быть «справедливым» (just transition), чтобы не усугублять неравенство и не оставлять без работы работников традиционных энергетических секторов.

Современная электроэнергетика переживает беспрецедентную трансформацию, обусловленную технологическим прогрессом, экологическими требованиями и изменением моделей потребления. Переход к устойчивой, децентрализованной, цифровой и гибкой энергосистеме это необходимость для обеспечения энергетической безопасности, экономического роста и климатической стабильности.

Ключевыми факторами будущего развития станут интеграция возобновляемых источников энергии, масштабное внедрение систем хранения, цифровизация сетей и активное участие потребителей в энергетическом процессе. Однако успех этого перехода будет зависеть от согласованных действий государств, бизнеса, научного сообщества и гражданского общества. Только комплексный, системный подход

позволит построить электроэнергетику будущего – чистую, надёжную, доступную и устойчивую.

ЛИТЕРАТУРА

1. Международное энергетическое агентство (МЭА). Перспективы развития мировой энергетики на 2023 год. Париж: Издательство МЭА, 2023.
2. Международное агентство по возобновляемым источникам энергии (IRENA). Стоимость производства возобновляемой энергии в 2022 году. Абу-Даби: IRENA, 2023.
3. Европейская комиссия. Европейский зелёный курс. COM(2019) 640 final. Брюссель, 2019.
4. Arefjev, A.S., Antoshkin, V.A., Yudaev, Yu.A. Modelling of vacuum breakdown formation В сборнике: International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, ISDEIV. 19th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). Xian, China, 2000. C. 37-38.

УДК 338.45:621

Кирьяков Олег Владиленович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Машиностроение, энергетика и автомобильный транспорт» РИ(ф)МПУ, Olegkir1971@gmail.com, SPIN 9440-0579

Юдаев Юрий Алексеевич, д-р техн. наук, профессор кафедры «Машиностроение, энергетика и автомобильный транспорт» РИ(ф)МПУ, yu.yudaev@mail.ru, SPIN 6293-0029

Кирьяков Андрей Олегович, студент РИ(ф)МПУ, Olegkir1971@gmail.com

Токарев Андрей Олегович, доцент, доцент кафедры «Машиностроение, энергетика и автомобильный транспорт» РИ(ф)МПУ, Olegkir1971@gmail.com

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СТРЕССА ДИСПЕТЧЕРА ЦУС

Аннотация: в статье рассматриваются вопросы мониторинга состояния диспетчера ЦУС, как ключевой фигуру ответственной за безопасную и безаварийную эксплуатацию электроэнергетического комплекса. Рассмотрены основные требования к методом мониторинга, проведен анализ существующих методов и сделан

5. Лунд Х. и др. «Умная энергетика и интеллектуальные энергетические системы». Energy, том 137, 2017, стр. 556–565.

6. Чжан С. и др. «Роль накопителей энергии в глубокой декарбонизации производства электроэнергии». Nature Communications, том 10, 2019, статья 1710.

7. Анисимов В.Ф., Богданова Н.П., Сенин П.В., Юдаев Ю.А. Моделирование процесса формирования импульсного разряда в двухэлектродном промежутке с холодным катодом методом частиц Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2003. Т. 67. № 9. С. 1322-1327.

8. Бышов, Д.Н., Юдаев, Ю.А. Моделирование переходных процессов в системах электроснабжения агропромышленных объектов. Рязань, 2020.

9. BloombergNEF. Прогноз развития рынка накопителей энергии на 2023 год. Нью-Йорк: Bloomberg Finance L.P., 2023.

вывод, о применение метода основанном на анализе вариабельности сердечного ритма, как оптимальном. Приведены данные о возможностях данного метода, его физиологическим основам, методам расшифровки полученных значений. Так же приведена обоснованная рекомендация о применение в качестве первичного преобразователя современных смарт часов. Показаны дополнительные возможности данного метода.

Ключевые слова: безопасность, стресс, диспетчер, диагностика, ПАРС, мониторинг состояния.

Одной из актуальных проблем электроэнергетики является повышение безопасности функционирования энергетического комплекса. Центры управления сетью (ЦУС) являются важнейшими элементами инфраструктуры электроэнергетики, обеспечивающими стабильную работу энергосистем и безопасность персонала, и, ключевой фигурой, обеспечивающей эту стабильность, является диспетчер ЦУС. Работа диспетчера ЦУС характеризуется высокой психофизической нагрузкой ввиду того, что он несет ответственность за принятие решений в условиях неопределенности и стресса, что создает высокие требования к его психическому состоянию и работоспособности. Результатом ошибочных действий может быть как локальная

неисправность, в результате которой без электроэнергии останутся потребители, так и глобальная авария. Таким образом в течении рабочего дня необходимо предусмотреть возможность непрерывного мониторинга психофизиологического состояния диспетчера ЦУС для предотвращения ошибок, вызванных снижением внимания, усталости или эмоциональным истощением [1, 2].

Диагностика психоэмоционального состояния диспетчера включает разнообразные подходы и инструменты, среди которых выделяют физиологические измерения, психологическое тестирование и компьютеризированные системы мониторинга.

Метод, который применим для подобного мониторинга должен удовлетворять ряду требований:

- способ съема информации с диспетчера должен быть максимально необременителен для него;

- метод должен позволять оценивать общее состояние диспетчера, а не только отдельные психофизиологические параметры;

- возможность не только оценки текущего состояния диспетчера, но и возможность прогнозирования;

- ввиду повышенной защищенности диспетчерских залов ЦУС, не желательно присутствие дополнительных сотрудников занятых диагностикой диспетчеров;

- возможность ввести базу данных по каждому диспетчеру, как для возможности прогнозирования и выявления патологий, так для оценки результативности организационных и технических мероприятий, реализуемых в ЦУС, направленных на улучшение условий труда сотрудников;

- желательно что бы применяемый метод позволял идентифицировать сотрудника, что важно как для контроля нахождения на своем рабочем месте, учета соблюдения режима труда и отдыха, так и для предотвращения несанкционированных действий неустановленными лицами.

Широкое распространение получили субъективные способы, основанные на заполнении различных тестов и самодиагностики. Подобное тестирование включает опросники и анкеты, предназначенные для выявления особенностей поведения, личностных качеств и степени выраженности симптомов тревожности, депрессии и раздражительности. Несмотря на широкое распространение, им присущи ряд недостатков, главные из которых – требуется

время для их прохождения, в результате чего растет общая усталость персонала, сокращается время выделенное на отдых или сокращается рабочее время, и так же субъективность тестов проявляется в том, что человек знающий структуру и методы построения этих тестов, при желании может фальсифицировать результаты тестов.

Объективные методы основаны на инструментальных методах контроля состояния организма. Их достоинства – сложность обмана со стороны обследуемого человека, в основном пассивное участие обследуемого, поэтому их можно проводить как во время отдыха, так и во время работы диспетчера.

В настоящее время существует достаточно большое количество медицинских методик, позволяющих оценивать состояние пациента в реальном времени. В основном они применяются для мониторинга состояния человека в больничной палате, когда он находится в лежачем положении, или малоподвижен. Данные методы хотя и являются хорошо изученными, не пригодны для непрерывного мониторинга состояния диспетчера ЦУС.

Большое количество методик оценки состояния пациента основаны на аппаратуре для кардиомониторинга, наиболее известным из них является метод разработанный Н. Д. Холтером. Основа этих методов – непрерывное снятие электрокардиограммы, и анализ ее. Методы являются общепринятыми и достоверными. Общим недостатком этих способов является достаточно обременительный способ получения информации – контактные датчики, закрепляемые непосредственно на теле пациента. Применение этих способов позволяет получить надежный результат как по диагностике текущего состояния, так и по выработке прогноза, но использование контактных датчиков недостаточно комфортно, и само уже приведет к повышению уровня стресса. К тому же требует присутствие специалиста, который закрепляет эти датчики ежедневно, перед началом смены, на теле диспетчера, и после окончания рабочего дня обрабатывает кожу для предотвращения инфекций и раздражений.

Наиболее применимый способ мониторинга состояния диспетчера ЦУС – это метод, разработанный советским ученым, профессором Романом Марковичем Баевским. данный метод основан на математическом анализе вариабельности сердечного ритма. Явление вариабельности сердечного ритма было обнаружено

швейцарским ученым Альбрехом фон Галлером в 1760 г, рис. 1.

На вариацию сердечного ритма влияет большое количество различных факторов, так как регуляция системы кровообращения является многоконтурной, иерархически организованной структурой, в самом обобщенном виде отображенная на рис. 2. [3].

Несмотря на давнее открытие этого явления активно применять его в диагностических целях стали с середины двадцатого века, что было связано с активным развитием космической медицины. Задача, которая ставилась перед ней, с чем-то созвучна с задачей

по мониторингу состояния диспетчера – оценить текущее состояние стресса, общее состояние организма, спрогнозировать изменение его, и оценить возможность надежного, прогнозируемого, и адекватного управления техническим средством, достоверность и объективность управления им. Так же и используемое медицинское оборудование не должно по возможности обременять космонавта, который и так находится в состоянии стресса и перегрузок. Дополнительное ограничение так же было со стороны уровня развития вычислительной техники 50-60 годов 20 века.

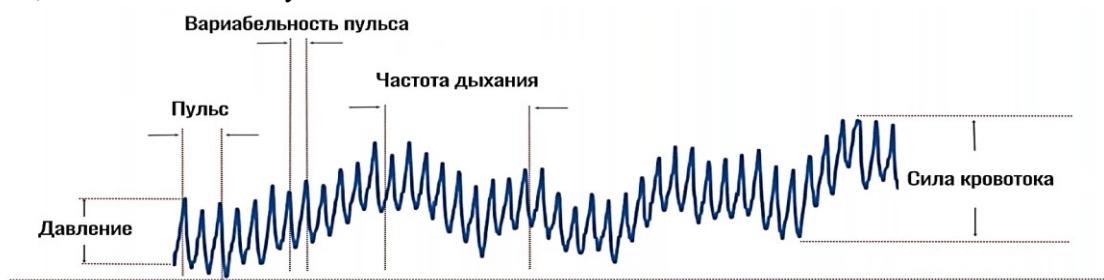


Рисунок 1 – Вариабельность сердечного ритма

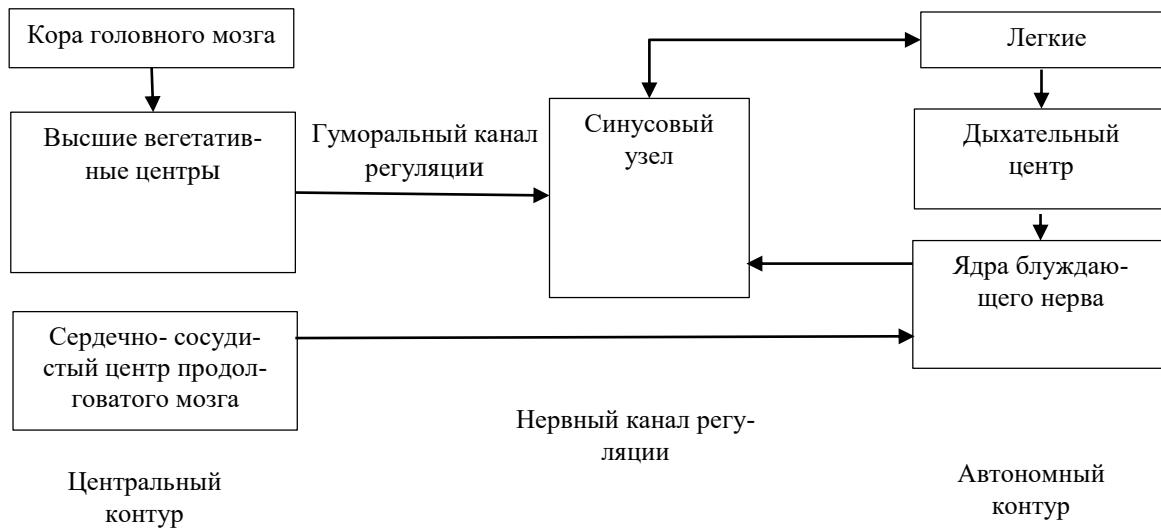


Рисунок 2 – Схема двухконтурной регуляции сердечного ритма

В результате исследований был разработан математический аппарат, позволяющий по регистрируемой хронопульсограмме оценивать уровень стресса организма, и по тренду его вырабатывать прогноз его изменения.

При реализации этого метода, на основании регистрируемой хронопульсограммы производится непрерывный расчет показателя активности регуляторных систем (ПАРС), который предусматривает диагностику функциональных состояний организма (но не

заболеваний) обследуемого. ПАРС определяется в баллах по специальному алгоритму, учитывающему статистические показатели, показатели гистограммы и данные спектрального анализа хронокардиограмм. Характерной особенностью метода является его неспецифичность по отношению к нозологическим формам патологий и высокая чувствительность к самым разнообразным внутренним и внешним воздействиям (3-5).

Значения ПАРС выражаются может находиться от 1 до 10. На основании анализа значений ПАРС могут быть диагностированы следующие функциональные состояния:

- ПАРС = 1-2(норма); состояние оптимального (рабочего) напряжения регуляторных систем, необходимое для поддержания активного равновесия организма со средой;

- ПАРС = 3-4; состояние умеренного напряжения регуляторных систем, когда для адаптации к условиям окружающей среды организму требуются дополнительные функциональные резервы. Такие состояния возникают в процессе адаптации к трудовой деятельности, при эмоциональном стрессе или при воздействии неблагоприятных экологических факторов;

- ПАРС = 4-6; состояние выраженного напряжения регуляторных систем, которое связано с активной мобилизацией защитных механизмов, в том числе с повышением активности симпатико-адреналовой системы и системы гипофиз-надпочечники;

- ПАРС = 6-8; состояние перенапряжения регуляторных систем, для которого характерна недостаточность защитно-приспособительных механизмов, их неспособность обеспечить адекватную реакцию организма на воздействие факторов окружающей среды. Здесь избыточная активация регуляторных систем уже не подкрепляется соответствующими функциональными резервами;

- ПАРС = 8-10; состояние истощения (астенизации) регуляторных систем, при котором активность управляющих механизмов снижается (недостаточность механизмов регуляции) и появляются характерные признаки патологии. Здесь специфические изменения отчетливо преобладают над неспецифическими [5].

Изменение состояния диспетчера будет хорошо видно, как изменение баллов оценки ПАРС, достаточная информативность метода позволяет анализировать эти данные как врачу, так и самому обследуемому. Скорость отклика ПАРС достаточно высокая, и при появлении стрессообразующего фактора реакция на него уже будет выявлена через несколько кардиоинтервалов [6, 7].

Таким образом, этот метод достаточно хорошо разработан к настоящему времени, имеется развитый математический аппарат, подтвержденная достоверная интерпретация результата. Выпускается достаточно большой ассортимент аппаратуры для анализа вариабельности ритма сердца.

На рис. 3 приведен выходной документ комплекса «Варикард». Как из него видно на экране комплекса отображается не только текущий уровень стресса, для повышения наглядности окрашенный в разные цвета, но и дополнительные параметры, характеризующие вариабельность пульса.

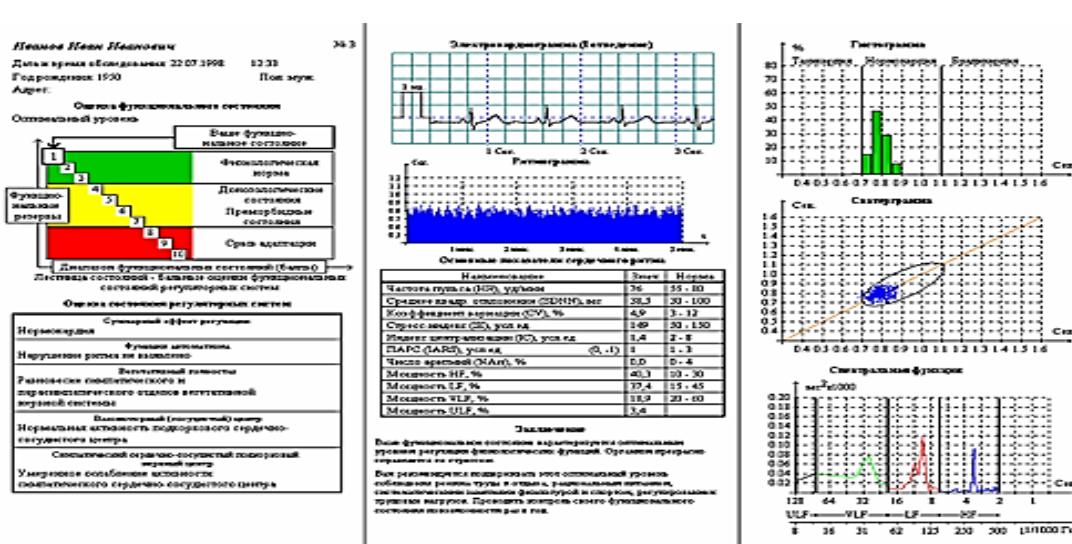


Рисунок 3 – Оценка уровня здоровья на основе анализа вариабельности сердечного ритма (Выходной документ комплекса "Варикард") [3]

В настоящее время широкое распространение получили так называемые смарт часы,

которые кроме отображения времени и возможности приема – отправления аудио и видео сообщений имеют возможность регистрации

пульса владельца. Достоинства применения для регистрации хронопульсограммы смарт часов является их широкое распространение, не обременительное применение, к тому же, учитывая то, что подключения данного устройства к устройству сбора информации происходит с использованием беспроводного протокола Bluetooth – при этом не происходит ограничение движений диспетчера. Так же появляется возможность организации мониторинга состояния здоровья не только на рабочем месте, но и при нахождении в комнате отдыха при установке приемников сигнала Bluetooth в ней.

Непрерывный мониторинг как за рабочим местом, так и во время нахождения в комнате отдыха позволяет определять факторы вызывающие наибольший стресс у каждого работника, оперативно оценивать результаты оптимизации рабочего процесса, и снижение уровня стресса во время перерывов в работе.

Появляется возможность вырабатывать индивидуальные рекомендации по организации и чередованию рабочего времени, и времени отдыха, оптимальной организации рабочего места именно для конкретного работника. При уровнях стресса превышающие допустимые, для нормальной работы, когда снижается достоверность принятия оптимальных решений, возможно блокирование данного рабочего места, с извещением об этом событии руководство ЦУС.

Так же дополнительно появляется возможность автоматической идентификации нахождения диспетчера на рабочем месте, по ID часов сотрудника находящемся на конкретном рабочем месте, и блокировки рабочего компьютера при несовпадении ID часов.

Таким образом, применение данного метода позволяет оценивать уровень стресса работника в реальном масштабе времени, и так же дает возможность в течении рабочего дня выдавать рекомендации по дополнительному отдыху, при регистрации повышенного уровня психофизиологического напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

- Бикетова Т.Н. Исследование динамики работоспособности диспетчеров дежурной смены на примере ФКУ «ЦУКС ГУ МЧС России по Алтайскому краю», Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского Социология. Педагогика. Психология. Том 8 (74). 2022. – № 1. – С. 78-86

- Кирьяков, О.В. Мониторинг психофизиологического состояния диспетчера ЦУС на

основе анализа вариабельности сердечного ритма и выбор способа регистрации кардиоинтервалов / О.В. Кирьяков, В.М. Зотикова, Ю.А Юдаев // Вестник политеха. – 2024. – №7. – С. 34-36.

- Баевский Р.М. Вариабельность сердечного ритма: теоретические аспекты и возможности клинического применения / Р.М. Баевский, Г.Г. Иванов // Ультразвуковая и функциональная диагностика. – 2001. – № 3. – С. 108-127.

- Математический анализ изменений сердечного ритма при стрессе / Р.М. Баевский, О.И. Кириллов, С.З. Клецкин. – М.: Наука, 1984. – 224 с

- Баевский, Р.М. Анализ вариабельности сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем / Р.М. Баевский, Г.Г. Иванов, Л.В. Чирейкин и [др.]. // Вестник Аритмологии. – 2002. – №24. – С. 65-86.

- Лебедева, Н.Н. Корреляции между показателями тревожности и вариабельности сердечного ритма у мужчин и женщин при аффективных расстройствах / Н.Н. Лебедева, Е.Д. Каримова, А.В. Вехов и [др.]. // Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова. – 2019. – Т. 69. – № 6. – С. 700-710.

- Никулина, М.В. Опыт оценки вариабельности сердечного ритма по сглаженным кардиоинтервалограммам, / М.В. Никулина, В.А. Антонец // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. – 2022. – №2 – С. 177-188.

- Кирьяков, О.В. Особенности выбора диагностических датчиков для оценки состояния пациента, применяемых в магнитотерапевтической практике / О.В. Кирьяков, С.В. Никитин // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2009. – № 7. – С. 26-31.

- Бокерия, Л.А. Вариабельность сердечного ритма: методы измерения, интерпретация, клиническое использование / Л.А. Бокерия, О.Л. Бокерия, И.В. Волковская // Анналы аритмологии: журнал. – 2009. – № 4. – С. 21-32.

- Пустовойт, В.И. Вариабельность сердечного ритма, как основной метод оценки функционального состояния организма спортсменов, принимающих участие в экстремальных видах спорта / В.И. Пустовойт, М.С. Ключников, С.Е. Назарян и [др.]. // Современные вопросы биомедицин. – 2021. – Т. 5. – №2.

- Устройство для выделения сигналов пульса Жулев В.И., Кирьяков О.В., Никитин С.В. Патент на изобретение RU; C1, 20.12.2007.

УДК 621.3.049.75

Официн Сергей Иванович, канд. пед. наук, доцент, доцент кафедры «Машиностроение, энергетика и автомобильный транспорт» РИ(ф)МПУ, s.ofitsin@yandex.ru, SPIN 6149-3490

Каликов Андрей Александрович, студент РИ(ф)МПУ, andreikulik2004@gmail.com

Гришанов Роман Андреевич, студент РИ(ф)МПУ, rota.grischanov2014@yandex.ru

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КЛАССИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНОЙ ПЛАНЫ ДЛЯ МОНТАЖА ЭЛЕКТРОННОГО УСТРОЙСТВА

Аннотация: в статье рассматривается технология изготовления печатной платы (ПП) в «домашних условиях», получившая широкое распространение благодаря развитию доступного оборудования и материалов. Проведен обзор классического метода ЛУТ (лазерно-утюжная технология) и его ключевых этапов: подготовка фотошаблона, перенос тонера на фольгированный стеклотекстолит, травление и механическая обработка. Подробно проанализированы характерные дефекты каждого этапа и предложены практические методы их устранения. Уделено внимание современным методам совершенствования технологии, таким как метод фотолитографии с использованием УФ-ламп, станков с ЧПУ для фрезерования и гравировки, а также аддитивной технологии прямого трафаретного нанесения токопроводящих паст. Сделан вывод о том, что комбинация традиционных и инновационных подходов позволяет достигать качества, сопоставимого с промышленными образцами, для широкого класса радиоэлектронных устройств.

Ключевые слова: печатная плата, ЛУТ, стеклотекстолит, тонер, травление, фотополистирол, фрезерование ЧПУ, тонер.

Печатная плата (ПП) – основной конструктивный элемент современной электроники, обеспечивающий механическое крепление компонентов и электрическое соединение между ними. Развитие микроэлектроники стимулировало рост спроса на быстрое и недорогое создание электронных устройств. Хотя промышленное производство ПП обеспеч-

чивает высочайшее качество и воспроизводимость, оно экономически нецелесообразно для единичных экземпляров или малых серий в силу высокой стоимости технологической аппаратуры [1,3,6].

В этом контексте технология изготовления ПП в «домашних условиях» не теряет своей актуальности. Она позволяет в короткие сроки (от нескольких часов до суток) получить готовое изделие для монтажа на него схемы и создания конечного устройства для использования в бытовых или исследовательских целях.

Актуальность данной темы обусловлена растущим интересом к DIY (Do It Yourself – «сделай сам») электронике и робототехнике, где требуется оперативное, малообъемное и зачастую небюджетируемое со стороны создания прототипов.

Целью работы является систематизация знаний по классической субтрактивной технологии изготовления ПП в «домашних условиях», анализ ее типичных проблем и комплексный обзор современных методов ее совершенствования, включая переход к аддитивным методам.

Задачи:

- подробное описание этапов классического ЛУТ-метода;
- выявление и классификация характерных дефектов на каждом этапе;
- анализ способов минимизации дефектов и улучшения качества ПП;
- исследование альтернативных и перспективных технологий изготовления ПП в «домашних условиях».

1. Рассмотрим субтрактивный метод изготовления печатных плат.

Данный метод является наиболее распространенным в радиолюбительской среде благодаря своей простоте и низких затратах. Его суть заключается в удалении (субтракции) незащищенных участков медной фольги с поверхности диэлектрической основы (обычно стеклотекстолита) путем химического травления.

1.1 Подготовка и создание фотошаблона.

Процесс начинается с проектирования рисунка печатных проводников в специализированных программах, таком как Sprint Layout или в простых графических редакторах. Ключевое требование – получение файла с контрастным изображением проводников в масштабе 1:1.

Способ 1 – лазерно-утюжная технология (ЛУТ). Медная поверхность стеклотекстолита зачищается от окиси и протирается спиртом,

для очищения от мелких частиц и обезжиривания. Распечатанный на глянцевой бумаге (например, из журналов) рисунок совмещается с поверхностью медной фольги и переносится на эту поверхность с помощью нагрева (утюга или ламинатора).

Тонер лазерного принтера, состоящий из полимерных частиц, плавится и пристает к меди, образуя стойкое к травлению защитное покрытие. (рис. 1)



Рисунок 1 – Отпечатывание тонера на медной поверхности стеклотекстолита

Способ 2 – использование фоторезиста. На предварительно очищенную медную поверхность наносится светочувствительный состав (жидкий или пленочный фоторезист), так, чтобы не допустить образования воздушных пузырей. Затем накладывается прозрачный фотобаблон, распечатанный на пленке на лазерном или струйном принтере. Последующая засветка ультрафиолетовой (УФ) лампой (или солнечным светом, содержащим УФ лучи, но этот метод менее эффективный в силу возможной ошибки с временем засвечивания) приводит к полимеризации фоторезиста в незакрытых участках. После проявки в специальном растворе (например, в каустической соде) незасвеченные участки смываются, обнажая медь для последующего травления [3,4].

1.2 Травление меди. (рис. 2)

Задача данного этапа – удалить медь с участков, не защищенных тонером или фоторезистом. Наиболее распространенными являются следующие травильные растворы:

- хлорное железо (FeCl_3) является универсальным и недорогим для радиолюбителей средством. Недостатки хлорного железа: высокая загрязняемость, низкая скорость травления и сложность регенерации раствора;

- солевой раствор с перекисью водорода ($\text{H}_2\text{O}_2 + \text{HCl} + \text{NaCl}$) – более современная и экологичная альтернатива. Перекись водорода окисляет медь, а кислота переводит ее в растворимую соль. Процесс протекает быстрее, чем в хлорном железе, а компоненты легкодоступные и дешевые;



Рисунок 2 – Травление заготовки в хлорном железе

- сульфат меди (CuSO_4) с хлоридом натрия (NaCl), менее эффективный, но доступный вариант. При смешивании CuSO_4 и NaCl образуется комплексное соединение – тетрахлоркуарат натрия ($\text{Na}_2[\text{CuCl}_4]$), способное активно растворять медь. Процесс травления протекает при комнатной температуре, его скорость зависит от концентрации реагентов.

Для интенсификации процесса травления используют подогрев раствора и перемешивание [5].

1.3 Механическая обработка.

После травления плату промывают, а защитный тонер или фоторезист удаляют ацетоном или растворителем. Далее выполняются следующие операции:

- сверление отверстий: выполняется с помощью мини-дрели (гравера) с использованием твердосплавных сверл малых диаметров (от 0,8 до 1,2 мм). (рис. 3, 4) Критически важна точность центрирования и перпендикулярность сверла, так как некачественное выполнение работы может привести к некорректной работе будущего устройства на основе этого изделия;

- лужение: нанесение на медные дорожки слоя припоя для защиты от окисления и облегчения последующего монтажа. Может выполняться паяльником, с помощью паяльной пасты или обработкой поверхности смесью спирта и измельченной канифоли [2,3,4,5].

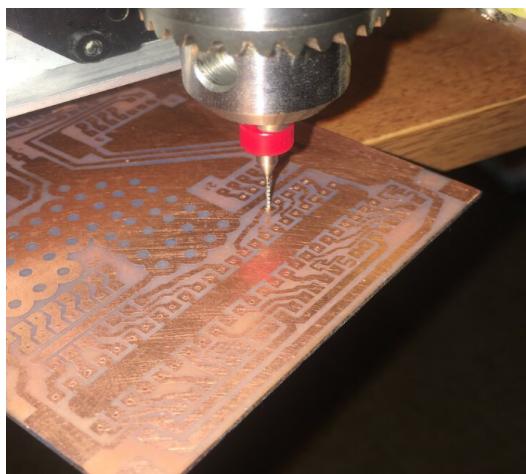


Рисунок 3 – Сверление отверстий в печатной плате

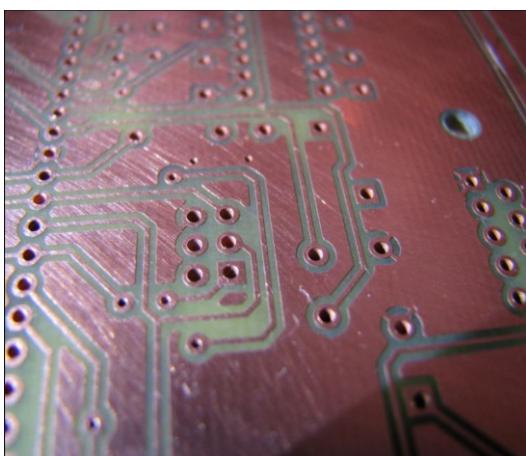


Рисунок 4 – Готовая ПП с просверленными отверстиями

2. Рассмотрим анализ дефектов и пути совершенствования классической технологии.

Несмотря на кажущуюся простоту, ЛУТ-метод сопряжен с рядом типичных проблем, снижающих качество и выход пригодных изделий [2,4,5]. Виды дефектов и способы их устранения приведены в таблице 1.

3. Выясним перспективные методы совершенствования технологии изготовления печатных плат.

Эволюция «гаражных» технологий идет по пути повышения точности, повторяемости и снижения трудоемкости.

3.1 Переход от ЛУТ к фотолитографии. (рис. 5)

Центрифугированием на медную поверхность наносится слой фоторезиста. Далее, после предварительного запекания в печи (процесс занимает несколько минут при температуре от 100 до 120 °C, позволяет испарить растворитель, содержащийся в фоторезисте), проводится засвечивание фоторезиста через

фотошаблон. Затем ненужные части фоторезиста удаляются проявителем. Метод с использованием фоторезиста хотя и требует большего количества этапов, но позволяет достичь более высокого разрешения (от 0,1 до 0,12 мм) и лучшей повторяемости по сравнению с ЛУТ. Совершенствование заключается в:

- создании высококонтрастного фотошаблона: использование высокоплотных пленок и специальных режимов печати для получения абсолютно непрозрачных участков;

- применении УФ-LED экспонирующих камер: вместо самодельных кассет с УФ-лампами используются компактные камеры с LED-матрицами, обеспечивающие равномерную за светку и точное дозирование экспозиции. [3,4]

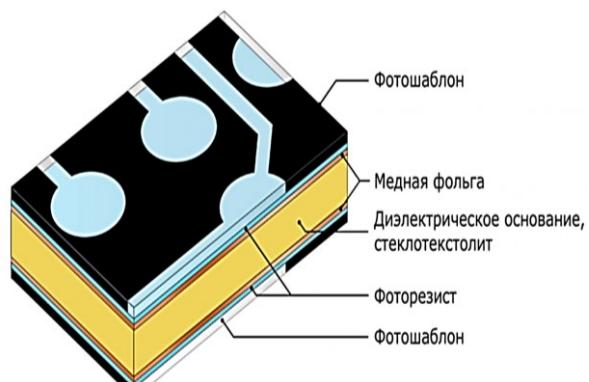


Рисунок 5 – Строение многослойной ПП при использовании метода фотолитографии

3.2. Фрезерование печатных плат на станках с ЧПУ (рис. 6)

Данный метод является бесхимическим и полностью цифровым. Миниатюрный фрезерный станок с ЧПУ управляет программой, генерированной из файла проекта ПП. Фреза последовательно удаляет медь вокруг будущих проводников.

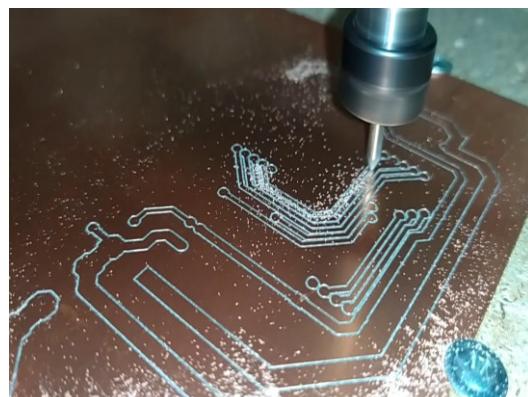


Рисунок 6 – Фрезерование ПП с помощью станка с ЧПУ

Таблица 1 – Характерные дефекты ЛУТ-метода и методы их устранения

Этап	Дефект	Причина	Метод устранения и совершенствования
Подготовка шаблона	Непропечатанные участки, бледный тонер	Низкий уровень тонера в картридже, экономичный режим печати	Замена / заправка картриджа, печать в режиме наивысшего качества, использование специализированного ПО для управления печатью
Перенос тонера	«Рваные» дорожки, неполный перенос	Недостаточная температура или время контакта, неравномерный прижим, низкое качество бумаги	Использование ламинатора вместо утюга. Предварительный нагрев заготовки. Применение специализированной термотрансферной бумаги
Травление	Подправливание под тонер, обрыв тонких дорожек	Плохое сцепление тонера с медью, перетравливание, агрессивный раствор	Тщательная подготовка поверхности меди (зачистка мелкой абразивной пастой, обезжикивание). Визуальный контроль процесса травления. Использование менее агрессивных растворов (например, на основе перекиси водорода) и более низкой концентрации реагентов
Сверление	Смещение отверстий, сколы фольги	Неточная разметка, биение патрона дрели или гравера, тупое сверло	Использование станка для сверления вместо ручной дрели или гравера. Печать на фотошаблоне маркеров центров отверстий. Применение острых твердосплавных сверл

Преимущества данного метода:

- отсутствие химических реактивов и отходов;
- высокая скорость prototyping (от файла до готовой платы за промежуток времени от 30 до 60 минут);
- возможность не только фрезеровать дорожки, но и вырезать контур платы;
- идеальная точность совмещения отверстий и проводников.
- Сложности при фрезеровании и пути их решения:
 - биение шпинделя и износ фрез: решается использованием качественных компонентов станка и правильным подбором режимов резания;
 - необходимость выравнивания заготовки: используется система автоматического выравнивания плоскости (Auto Leveling Sensor);
 - «юбка» по краям дорожек: устраняется точной калибровкой глубины резания и использованием острых V-образных фрез.

Данный метод является одним из самых перспективных для домашних лабораторий [2,7,8].

3.3. Рассмотрим аддитивные технологии.

В отличие от субтрактивных, аддитивные методы предполагают нанесение проводящего рисунка на диэлектрическую подложку.

Нанесение токопроводящих чернил. С помощью модифицированного струйного принтера или вручную (через трафарет) наносится

токопроводящая паста на основе серебра или графита. После этого требуется термообработка (отверждение). Пока этот метод не позволяет получать дорожки с низким сопротивлением и требует дорогостоящих материалов.

Лазерное восстановление графена или меди. Экспериментальный метод, при котором лазером на подложку, покрытую оксидом графена или специальным составом с солями меди, наносится рисунок. (рис. 7) Под действием лазера материал покрытия восстанавливается в проводящую форму [3,4].



Рисунок 7 – Нанесение токопроводящего слоя на текстолит

3.4. Рассмотрим гибридные методы.

Часто оптимальным является комбинирование технологий. Например, с помощью ЧПУ станка можно сверлить отверстия и наносить маркировку на плату, изготовленную методом фотолитографии. Или использовать ЛУТ-метод для создания быстрого прототипа, а для финального устройства заказать плату на заводе по файлу, проверенному на домашнем прототипе.

Таким образом, в работе проведен комплексный анализ технологии изготовления печатных плат в «домашних условиях». Показано, что классический ЛУТ-метод, несмотря на свою популярность, обладает рядом существенных недостатков, главные из которых – невысокая повторяемость и ограниченное разрешение.

Современные тенденции в совершенствовании этой технологии направлены на:

- повышение точности и повторяемости за счет замены ЛУТ на фотолитографию;
- полную цифровизацию и экологичность процесса благодаря использованию фрезерных станков с ЧПУ;
- развитие аддитивных методов, которые в будущем могут стать новым стандартом быстрого прототипирования.

В заключение отметим, что выбор конкретного метода зависит от требований к качеству изготавляемой платы, доступного бюджета, требуемой скорости и приемлемого уровня использования химических реагентов. На сегодняшний день для создания качественных и сложных прототипов наиболее оптимальным представляется комбинация программного обеспечения для проектирования, фотолитографии для формирования рисунка и ЧПУ-станка для точного сверления отверстий и вырезания контура. Это позволяет в «домашних условиях» достигать результатов, вполне сопоставимых

с промышленным производством для малых серий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров, А. Печатные платы. Практическое пособие для студентов технических специальностей, работников сферы «радиоэлектроника»: – М.: Ridero, 2019. – 79 с.
2. Бессонов, В. В. Радиоэлектроника для начинающих и не только. – М.: СОЛОН-Р, 2001. – 502 с.
3. Брусицына, Л. А. Технология изготовления печатных плат: Учебное пособие. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2015. – 200 с.
4. Медведев, А. М. Печатные платы. Конструкции и материалы. – М.: Техносфера, 2005. – 302 с.
5. Пирогова, Е. В. Проектирование и технология печатных плат: Учебник. – М.: Форум, 2005. – 559 с.
6. Ревич, Ю. В. Занимательная микроэлектроника. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 592 с.
7. Сосонкин В. Л. Системы числового программного управления: Учебное пособие. – М.: Логос, 2005. – 296 с.
8. Степаненко, И. П. Основы микроэлектроники: Учебное пособие. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2003. – 488 с.

УДК 621.311

Романова Юлия Александровна, магистрант кафедры «Машиностроение, энергетика и автомобильный транспорт» РИ(ф)МПУ, *Olegkir1971@gmail.com*

Кирьяков Олег Владиленович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Машиностроение, энергетика и автомобильный транспорт» РИ(ф)МПУ, *Olegkir1971@gmail.com*, SPIN 9440-0579

ОРГАНИЗАЦИЯ ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ РФ

Аннотация: в статье проведен анализ эволюции принципов планирования и управления режимами Единой энергосистемы (ЕЭС) России. Рассмотрены вызовы, связанные с интеграцией возобновляемых источников энергии (ВИЭ), распределенной генерации и активных потребителей. Обоснована необходимость перехода от

централизованной иерархической модели к гибридной, адаптивной архитектуре управления на основе технологий больших данных, искусственного интеллекта и предиктивной аналитики. Предложена концепция «Цифрового двойника ЕЭС России» как ключевого элемента для повышения надежности, эффективности и гибкости управления.

Ключевые слова: Единая энергосистема России, оперативно-диспетчерское управление, планирование режимов, цифровая трансформация, баланс электроэнергии и мощности, предиктивная аналитика, цифровой двойник, ВИЭ.

Введение

Электроэнергетика является основой национальной безопасности и экономического развития Российской Федерации. Единая энергосистема (ЕЭС) России, являясь одной из крупнейших в мире, характеризуется значительной протяженностью, разнородностью генерирующего оборудования и неравномерностью распределения

нагрузочных центров. Традиционная система планирования и управления режимами, сформированная в эпоху централизованной плановой экономики, доказала свою надежность в прошлом. Однако новые технологические, рыночные и экологические вызовы требуют глубокой модернизации существующих подходов.

Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью разработки новых принципов организации управления, способных обеспечить устойчивую работу ЕЭС в условиях:

1. Растущей доли нестабильной генерации возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

2. Развития распределенной энергетики.

3. Повышения требований к качеству и надежности электроснабжения.

4. Цифровой трансформации всех отраслей экономики.

Цель статьи – проанализировать современное состояние системы планирования и управления режимами ЕЭС России (рис. 1) и предложить концепцию ее развития на основе передовых цифровых технологий.



Рисунок 1 – Единая энергетическая система России

Классическая модель управления ЕЭС базируется на принципах иерархичности, централизации и территориальной распределенности. Ее основу составляют три временных горизонта:

1. Перспективное и текущее планирование (от года до суток). На этом этапе, осуществляемом Системным оператором (СО ЕЭС) совместно с АО «АТС», решаются задачи:

- разработка баланса мощности и электроэнергии;

- составления оптимального суточного графика нагрузки с учетом прогноза потребления, ремонтных кампаний и условий оптового рынка;

- проведения расчетов установившегося и динамического режимов для проверки соблюдения критериев надежности (N-1, N-2).

2. Оперативное управление (сутки, часы, минуты). Определяется диспетчерами

ОДУ и РДУ в реальном времени. Ключевые функции:

- регулирование частоты и перетоков активной мощности (Автоматическое вторичное регулирование частоты и перетоков мощности – АРЧМ, первичное регулирование частоты – ПРЧ);

- контроль и управление напряжениями и реактивной мощностью;

- ликвидация нарушений нормального режима, включая использование системной и противоаварийной автоматики (ПА).

В основе планирования режимов лежит четкое понимание потребностей в электроэнергии и мощности. Прогнозирование потребностей является результатом многофакторного анализа, основанного на применении современных технологий, накопленной статистической базы, знаний зависимости величины потребления от климатических условий, собственной и внешней прогнозной информации о динамике

изменения потребления субъектов РФ и крупнейших потребителей.

Годовой горизонт планирования электроэнергетических режимов используется при разработке режимных условий и координации вывода в ремонт и из эксплуатации объектов электросетевого хозяйства и генерации, а также ввода в эксплуатацию новых и реконструированных энергообъектов.

Системный оператор координирует составление владельцами оборудования годовых планов ремонта, определяя возможность обеспечения устойчивой работы энергосистемы при отключении и включении каждой единицы оборудования. При месячной корректировке план уточняется в зависимости от фактического и прогнозируемого электроэнергетического режима. Окончательное решение о возможности отключения оборудования для проведения ремонта принимается на этапе составления суточного диспетчерского графика.

Суточный диспетчерский график – основной инструмент управления энергосистемой – является завершающим этапом процесса планирования режимов.

Данная система обладает высокой предсказуемостью и управляемостью в условиях доминирования крупной тепловой, гидровой и атомной генерации. Однако ее главный недостаток – низкая адаптивность к быстрым, стохастическим изменениям в конфигурации сети и генерации. [1]

Тенденции развития электроэнергетической системы (ЭЭС) и изменения условия их функционирования привели к существенным трансформациям в структуре систем и режимах их работы, обусловленный увеличением масштабов энергосистем, децентрализацией энергоснабжения, реструктуризацией электроэнергетики либерализацией рыночных отношений в электроэнергетике.

Также, энергосистема РФ, создававшаяся достаточно давно, нуждается в серьезной модернизации основных фондов и обновлении как в части замены почти 50% физически и морально устаревшего оборудования, так и в применении новых технологий и оборудования, информационно-диагностических систем и систем управления. Реструктуризация электроэнергетики, рыночные условия функционирования электроэнергетики вносят свои особенности и проблемы.

Необходимо создание новой клиентоориентированной электроэнергетики, обеспечение существенно более надежного электроснабжения потребителей. Требуется применение нового энергоэффективного оборудования и новых технологий, обеспечивающих снижение издержек при производстве и передаче электроэнергии, снижение уровня потерь при транспорте тепловой и электрической энергии, оптимизацию величины и размещения резервных мощностей.

С переходом к рыночным отношениям ЭЭС вынуждены часто работать на пределе запасов по надежности. При таких условиях любое возмущение, особенно сверхнормативное, может привести к снижению надежности системы вплоть до её раз渲ла. Вследствие этого, системные операторы должны четко понимать границу по надёжности во всех режимах работы ЭЭС, что очень сложно сделать без анализа, связанного с большим объемом вычислений. Поэтому необходимы быстродействующие методы мониторинга, расчетов и анализа режимной надежности в реальном времени. А также нужны устройства при помощи которых станет возможным адаптивное интеллектуальное управление.

Концепция интеллектуальных энергосистем (ИЭС) с активно-адаптивной сетью (AAC) требует учета при принятии решений комплексного эффекта от управляющих воздействий, которые в свою очередь должны максимально удовлетворять всем требованиям надежности, качества и экономичности поддерживаемого режима.

Важную роль для повышения адаптивности управления играют эффективные и оптимальные методы и алгоритмы выбора мест и дозировок управляющих воздействий. А основными инструментами для реализации должны стать современные средства измерения и управления – устройства PMU, FACTS, накопители энергии и т.д.

Основным аспектом реализации интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью является повышение эффективности оперативно-диспетчерского управления [5].

Современные и перспективные энергетические комплексы являются сложными и много режимными электромеханическими системами, функционирующими со значительной степенью неопределенности параметров.

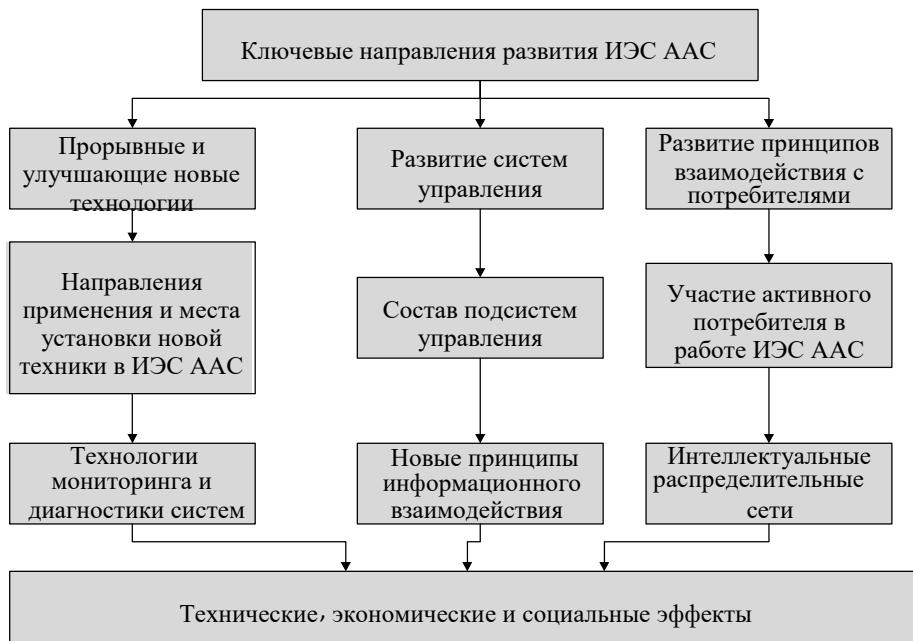


Рисунок 2 – Основные направления развития концепции ИЭС ААС

Кроме того, в реальной электрической сети с течением времени происходит изменение схемно-режимной ситуации. Это требует коррекции уставок всех включенных регуляторов напряжения, зависящих от параметров текущих режимов.

Следовательно, система управления уровнями напряжений в электрической сети должна быть адаптивной, а регуляторы FACTS – адаптивными и робастными, т.е. управляемыми по усовершенствованным законам регулирования.

Интеллектуальная электроэнергетическая система с активно-адаптивной сетью представляет собой электроэнергетическую систему нового поколения, основанную на мультиагентном принципе организации и управления.

Мультиагентные системы – это распределенная сеть связанных саморегулируемых аппаратных или программных агентов, которые работают совместно для достижения общего результата, являются направлением развития искусственного интеллекта. (рис. 3)

Для координации агентов предлагается использовать совокупность двух подходов, организационное структурирование (АПНУ, КСПА, ЦСПА) и распределенное мультиагентное планирование, для повышения интеллектуального уровня каждого из агентов.

Основной задачей локальных агентов с устройствами компенсации является быстрая

реакция на изменение напряжений в области влияния с последующей корректировкой и формирование УВ на централизованном уровне управления. (рис. 4) Сам программный агент является автономным, взаимодействует с другими локальными устройствами и общей системой управления, а также оперативно реагирует на изменения в системе.

Существует множество принципов построения архитектуры МАС, наиболее подходящей для решения задач децентрализованного адаптивного управления является многослойная архитектура [6].

Для осуществления адаптивного управления предлагается использовать ранжированный список узлов, с коэффициентами влияния их на соседние узлы. Устройства FACTS устанавливаются в краевые узлы из ранжированного списка и оснащаются саморегулируемыми программными агентами, связанными в общую мультиагентную систему (МАС).

Схема сети разбивается на подсистемы, в которых находятся краевые узлы с устройством компенсации и узлы, попадающие в область влияния данного краевого узла. На основе коэффициентов влияния краевых узлов на соседние системы управления устройствами компенсации формирует управляющие воздействия в различных схемно-режимных ситуациях для поддержания напряжения в узлах, уменьшения потерь и повышения режимной надежности.

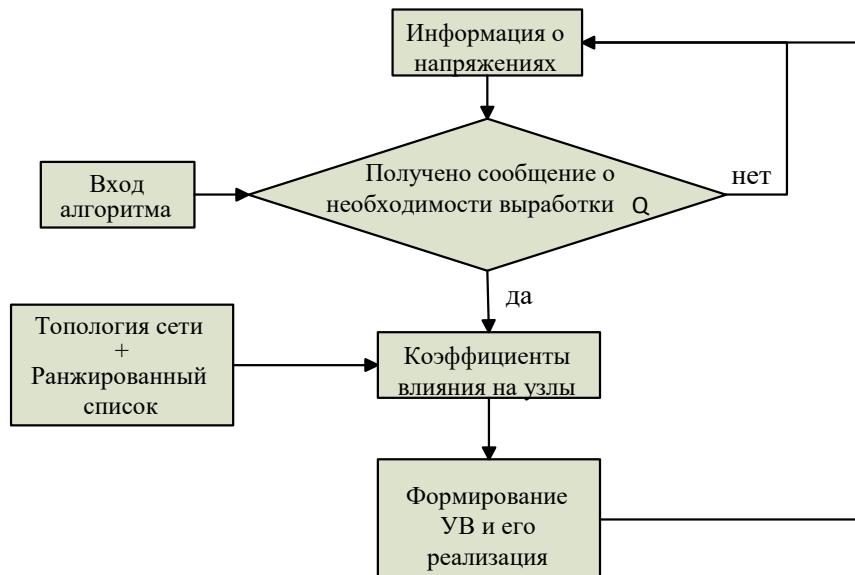


Рисунок 3 – Алгоритм работы программного агента

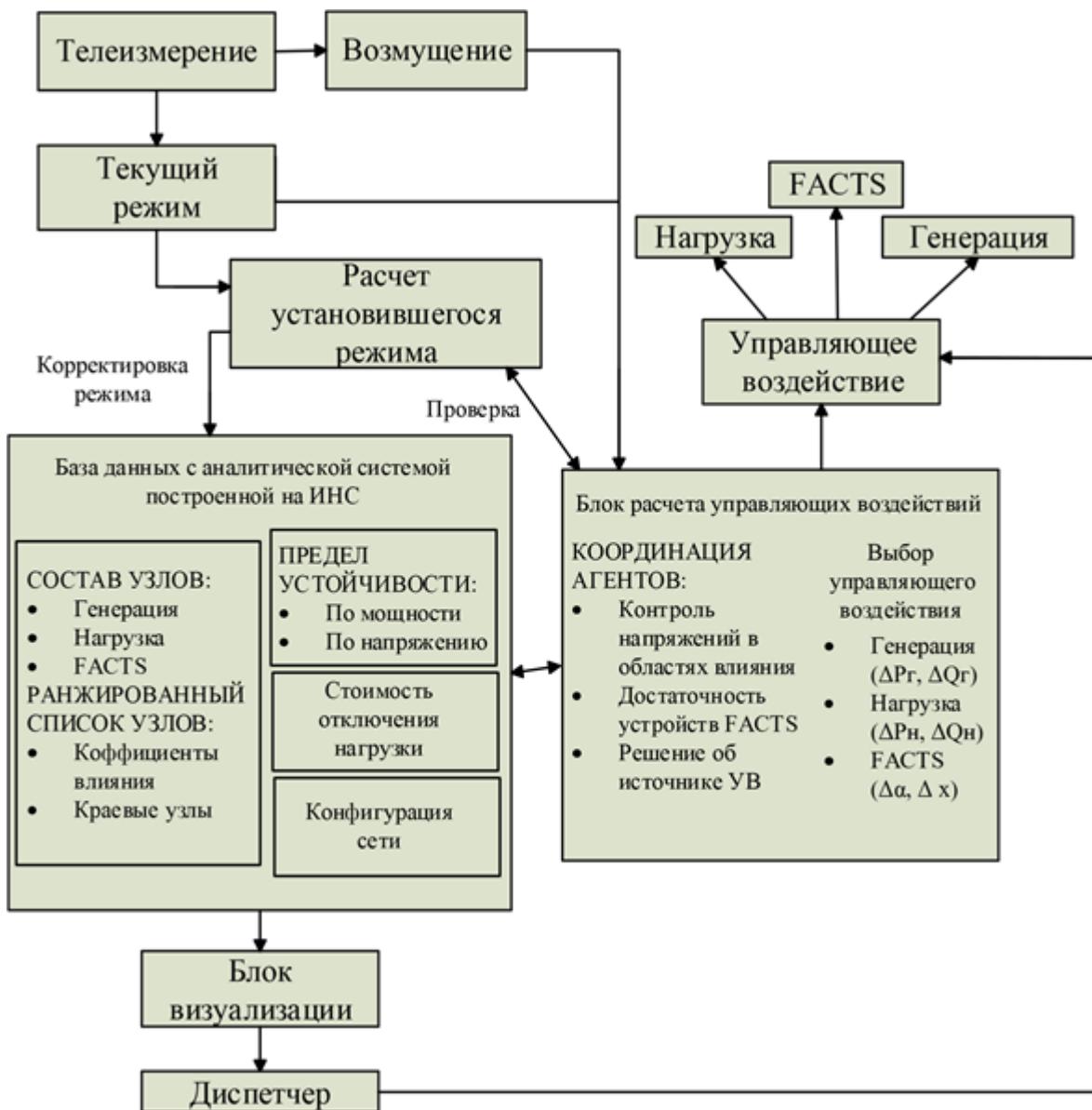


Рисунок 4 – Структура управления на централизованном уровне

Следующие факторы обуславливают необходимость эволюции традиционной модели:

- интеграция ВИЭ: Стихийная генерация от солнечных и ветровых электростанций носит нерегулируемый, стохастический характер, создавая значительные возмущения в энергосистеме и усложняя задачи балансировки;

- распределенная генерация (РГ): Массовое появление малых генерирующих объектов у конечных потребителей превращает пассивную распределительную сеть в активную, что требует ревизии принципов диспетчеризации;

- цифровизация и кибербезопасность: Из-за массового внедрения цифровых нейроустройств и систем требуется создания новых, киберустойчивых протоколов управления [4];

- рыночные механизмы: Усложнение рыночных отношений требует от системного оператора более тонких инструментов для управления спросом и обеспечения надежности.

В качестве ответа на указанные вызовы предлагается поэтапный переход к гибридной системе управления, сочетающей преимущества централизованного планирования с децентрализованной адаптивностью. Для управления тысячами объектов РГ и регулируемого спроса предлагается агрегировать их в Виртуальные Электростанции [3]. ВЭС, управляемая единым центром, может выступать на оптовом рынке как один объект, предоставляя системному оператору услуги по балансировке и резервированию, тем самым повышая гибкость всей системы.

Организация планирования и управления режимами ЕЭС России находится на пороге фундаментальных изменений. Традиционная иерархическая модель, доказавшая свою эффективность, постепенно будет трансформироваться в гибридную, адаптивную и интеллектуальную систему.

Ключевыми драйверами этой трансформации станут:

1. **Данные**, как основной актив для принятия решений.

2. **Искусственный интеллект и предиктивная аналитика**, как инструменты для проактивного управления.

3. **Цифровой двойник**, как интеграционная платформа для моделирования и оптимизации.

4. **Адаптивная автоматика и ВЭС**, как средства обеспечения гибкости и устойчивости.

Реализация предложенной концепции позволит не только повысить надежность и эффективность ЕЭС России, но и создать технологический задел для интеграции в глобальную энергетику будущего, основанную на принципах декарбонизации и цифровизации.

Таким образом, система планирования и управления режимами российской энергосистемы — это невидимый, но критически важный каркас национальной безопасности и экономики. Это результат работы десятков тысяч высококвалифицированных специалистов и сложнейших технологических комплексов. Сегодня она проходит испытание на прочность новыми технологиями, но ее надежная иерархическая архитектура служит залогом того, что свет в наших домах будет гореть стablyно, а промышленность — получать энергию для роста и развития. От эффективности этой «невидимой руки» зависит будущее цифровой экономики и технологический суверенитет России.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стратегия развития электроэнергетики Российской Федерации на период до 2035 года.
2. Приказы ФСТ России и регламентирующие документы СО ЕЭС.
3. Всемирный энергетический совет (World Energy Council). Отчеты о цифровизации энергетики.
4. Концепция цифровой трансформации энергетики Российской Федерации.
5. Методические указания по устойчивости энергосистем: утв. Приказом Минэнерго России от 30.06.2003 № 277. [Электронный ресурс]
6. Коган Ф.Л. О причинах развития известной аварии в Московской энергосистеме // Электричество. – 2008.

УДК 621.311

Шуктомов Кирилл Борисович, студент
РИ(ф)МПУ, Olegkir1971@gmail.com

Кирьяков Олег Владиленович, канд. техн. наук,
доцент, доцент кафедры «Машиностроение,
энергетика и автомобильный транспорт»
РИ(ф)МПУ, Olegkir1971@gmail.com,
SPIN 9440-0579

МЕТОДЫ АНАЛИЗА ПРОФИЛЕЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОГО ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Аннотация: в статье рассматривается актуальная проблема коммерческих потерь в электроэнергетике, обусловленных несанкционированным потреблением. Исследуются возможности применения цифровых систем мониторинга на основе анализа профилей мощности потребителей. Предложен комплексный подход, сочетающий детектирование аномалий в режиме реального времени, характерных для хищений электроэнергии, и функцию тарифной оптимизации для конечных пользователей. Описаны принципы работы системы, включающей интеллектуальные счетчики, серверную платформу для анализа данных и клиентское приложение. Показано, что использование динамического анализа профиля мощности позволяет повысить эффективность контроля за энергопотреблением и снизить коммерческие потери.

Ключевые слова: электроэнергетика, профиль мощности, несанкционированное потребление, хищение электроэнергии, детектирование аномалий, цифровые счетчики, тарифная оптимизация.

Введение

Современная электроэнергетика сталкивается с комплексом вызовов, среди которых значительное место занимают коммерческие потери. Одним из наиболее деструктивных факторов, приводящих к таким потерям, являются хищения электроэнергии. Несанкционированное потребление наносит значительный ущерб энергоснабжающим организациям, приводит к перегрузке сетей, их преждевременному износу и снижению общей надежности системы электроснабжения [1].

Традиционные методы контроля, основанные на периодических проверках и визуальном

осмотре, являются малоэффективными и трудозатратными. Они не позволяют оперативно выявлять факты вмешательства в работу измерительного оборудования или несанкционированных подключений к сетям. В этих условиях актуальной задачей становится разработка и внедрение автоматизированных систем, способных в непрерывном режиме анализировать параметры энергопотребления и детектировать аномалии, свидетельствующие о возможных хищениях [2].

Параллельно с этим существует проблема нерационального использования энергоресурсов со стороны добросовестных потребителей, вызванная отсутствием у них информации о режимах собственного потребления и способах оптимизации затрат на электроэнергию [3].

Целью данной работы является разработка метода и концепции системы, позволяющей решать обе задачи комплексно: детектировать несанкционированное потребление на основе анализа профилей мощности и предоставлять потребителям рекомендации по выбору оптимального тарифного плана.

Анализ проблемы и существующие методы детектирования

Несанкционированное потребление электроэнергии может осуществляться различными способами: механическое вмешательство в работу индукционных счетчиков, использование специальных устройств для искажения их показаний, создание неучтенных отводов от воздушных и кабельных линий, а также манипуляции с современными цифровыми приборами учета [4].

К традиционным методам выявления хищений относятся:

1. Организационные мероприятия: плановые и внеплановые проверки контролерами энергоснабжающих организаций, визуальный осмотр целостности пломб и схемы подключения.

2. Инструментальные методы: применение переносных анализаторов качества электроэнергии и токовых клещей для проверки соответствия токов в фазах и нулевом проводнике.

3. Расчетные методы: сравнение объемов отпущеной в распределительную сеть энергии с объемами, оплаченными потребителями (балансовый метод).

Основными недостатками этих методов являются их эпизодический характер, высокая трудоемкость и зависимость от человеческого фактора. Балансовый метод, хотя и указывает на наличие потерь в целом по сети, не позволяет локализовать конкретного нарушителя.

Перспективным направлением является внедрение систем автоматизированного контроля

и учета электроэнергии (АСКУЭ) на базе интеллектуальных цифровых счетчиков. Эти устройства позволяют регистрировать не только интегральное потребление, но и детальные параметры сети в реальном времени: активную и реактивную мощность, напряжение, ток, частоту [5]. Последовательность этих измерений во времени формирует так называемый профиль мощности потребителя, анализ которого открывает новые возможности для детектирования аномалий.

Профиль мощности как инструмент анализа

Профиль мощности потребителя – это динамическая характеристика, отражающая изменение потребляемой активной мощности в течение определенного временного интервала (суток, недели, месяца) [6]. Формируется он путем непрерывной регистрации данных с цифрового счетчика с заданной периодичностью (например, каждые 15-30 минут).

Для типовых категорий потребителей (жилые дома, офисы, предприятия) характерны устойчивые, повторяющиеся паттерны потребления. Например, для жилого сектора типичны два выраженных пика нагрузки – утренний (7-10 часов) и вечерний (18-23 часа), связанные с активным использованием бытовой техники. Ночью потребление минимально. Профиль мощности офиса, напротив, будет иметь один пик в дневные рабочие часы, а промышленного предприятия – зависеть от графика работы технологического оборудования.

Любое вмешательство в процесс измерения или несанкционированное подключение приводит к искажению нормального профиля мощности. Эти искажения могут проявляться в виде:

- резких немотивированных скачков мощности;

- несоответствия между высоким значением мощности и аномально низкими значениями напряжения и тока, что физически противоречит законам электротехники;

- появления потребления в периоды, когда объект должен быть обесточен (ночь на предприятии, день в жилом доме при отсутствии жильцов);

- существенного отклонения текущего профиля от исторических данных для данного потребителя или от эталонных профилей для аналогичных объектов.

Таким образом, непрерывный мониторинг и анализ профиля мощности позволяет перейти от эпизодического контроля к системному непрерывному мониторингу, обеспечивающему быстрое реагирование на нештатные ситуации.

Концепция системы анализа профилей мощности

Для практической реализации предложенного метода разработана концепция системы, состоящей из трех взаимосвязанных компонентов: аппаратного, серверного и клиентского.

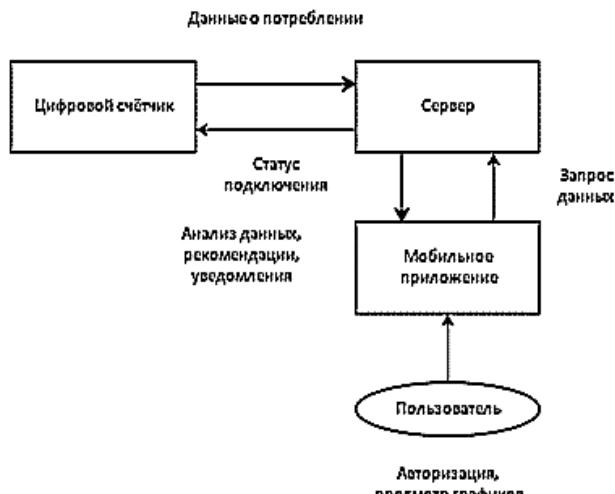


Рисунок 1 – Схема взаимодействия компонентов между собой

Аппаратный компонент (интеллектуальные счетчики)

В качестве первичных источников данных используются современные цифровые счетчики электроэнергии, оснащенные встроенными модулями связи (GPRS, LTE, NB-IoT, PLC). Основная функция – измерение с высокой периодичностью ключевых параметров: активной мощности (кВт), напряжения (В) и тока (А). Полученные данные в виде пакетов передаются по защищенным каналам связи на централизованную серверную платформу.

Серверная платформа (аналитический центр)

Это ядро системы, отвечающее за прием, хранение и интеллектуальную обработку поступающей информации. Его функционал включает:

1. Формирование профиля мощности: агрегация данных от счетчика и построение графика нагрузки потребителя за различные периоды.

2. Детектирование аномалий и хищений: реализация алгоритмов автоматического анализа. В рамках исследования применяется комбинация двух методов:

- энергетический анализ (статистический метод): для выявления резких скачков мощности используется правило "k-сигм". Система в режиме реального времени вычисляет скользящее среднее значение мощности и его стандартное отклонение за заданный временной интервал (например, последние 60 минут). Если текущее

значение мощности превышает порог, равный среднему плюс к стандартных отклонений (где k – настроочный коэффициент, например, 2.5), это классифицируется как аномалия, потенциально вызванная нештатной ситуацией или подключением мощной неучтенной нагрузки.

- физический анализ (логический метод): проверка корректности соотношения между электрическими параметрами. Если система фиксирует значительную активную мощность при аномально низких значениях напряжения и тока, это с высокой вероятностью указывает на манипуляции с измерительными цепями счетчика, являясь прямым признаком хищения.

3. Генерация уведомлений: при обнаружении аномалии, классифицированной как потенциальное хищение, система автоматически формирует и направляет уведомление службе безопасности энергоснабжающей организации для проведения целевой проверки.

4. Тарифная оптимизация: на основе анализа суточных и недельных паттернов потребления система определяет, в какие периоды сосредоточена основная нагрузка. Если потребитель активно использует энергию вочные часы

(с 23:00 до 07:00), ему рекомендуется многотарифный план с низкой ночной ставкой. Если потребление равномерно или смещено на дневные и вечерние пиковые часы, рекомендуется стандартный или дневной тариф соответственно.

Клиентское приложение

Для взаимодействия с конечным потребителем разработан интерфейс в виде мобильного или веб-приложения. Оно предоставляет пользователю:

- визуализацию его профиля мощности в виде интуитивно понятных графиков.

- уведомления о нерациональном использовании энергии (например, о работе устройств в длительном отсутствии).

Рекомендации по выбору оптимального тарифного плана, сгенерированные серверной платформой. Для энергокомпании интерфейс предоставляет дашборды с агрегированной статистикой, списком аномалий и алертами о подозрениях на хищении, что позволяет оптимально распределять ресурсы для проверок.

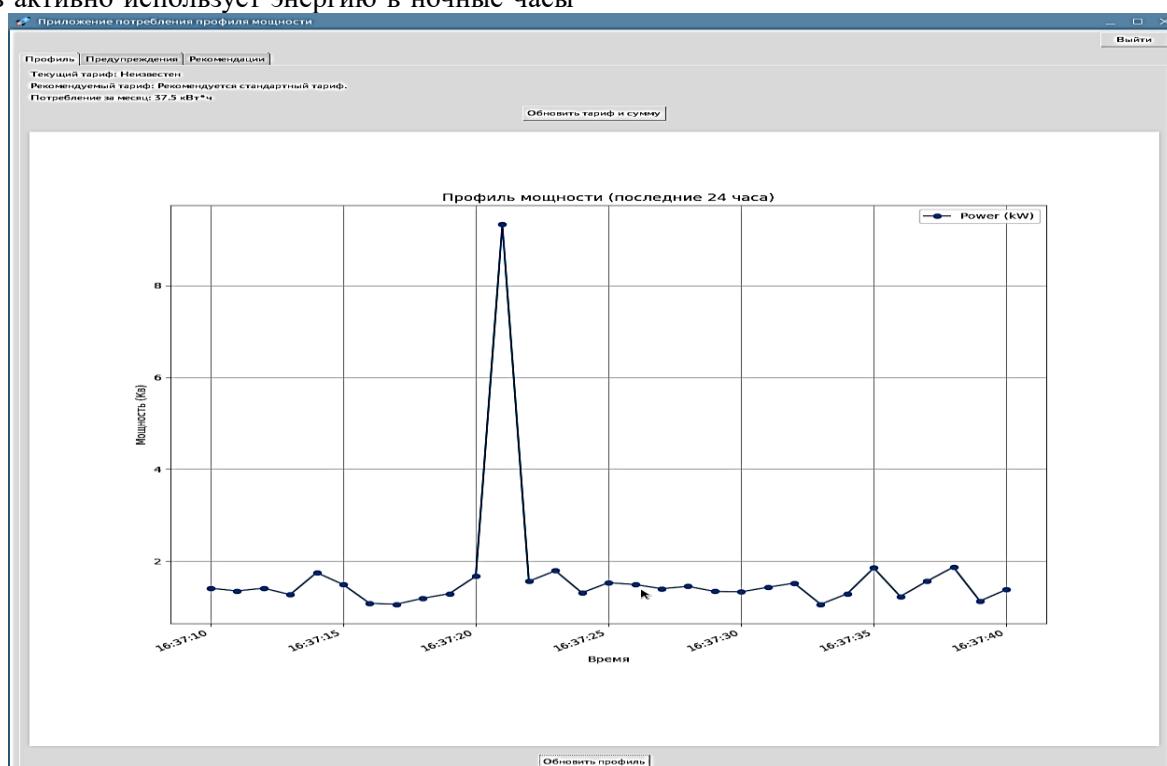


Рисунок 2 – Интерфейс клиентского приложения с графиком профиля мощности потребителя

Результаты

Разработанная концепция системы демонстрирует возможность эффективного противодействия несанкционированному потреблению за счет перехода от реагирования к предупрежде-

нию. Использование профиля мощности в качестве основного диагностического параметра позволяет выявлять не только очевидные, но и способы хищений, которые трудно обнаружить при визуальном контроле.

Ключевые преимущества предложенного подхода:

Оперативность: детектирование аномалий происходит в режиме, близком к реальному времени, что значительно сокращает период между фактом хищения и его фиксацией.

Локализация: система позволяет точно идентифицировать точку учета, на которой зафиксирована аномалия, что исключает необходимость массовых проверок и позволяет проводить точечные осмотры.

Объективность: решения основываются на данных телеметрии, а не на субъективных оценках, что снижает влияние человеческого фактора.

Двойной эффект: система не только борется с потерями, но и способствует энергосбережению, информируя добросовестных потребителей и помогая им снижать расходы на электроэнергию за счет выбора выгодного тарифа.

Важно отметить, что система не заменяет полностью контролеров, а выступает их интеллектуальным помощником, указывая на наиболее вероятные места нарушений и тем самым повышая эффективность их работы.

Внедрение такой системы создает технологический барьер для потенциальных нарушителей, повышая риски быть обнаруженными, и способствует формированию культуры легального и рационального энергопотребления.

Заключение

В работе предложен современный метод детектирования несанкционированного потребления электроэнергии, основанный на комплексном анализе профилей мощности. Показано, что данный метод обладает существенными преимуществами по сравнению с традиционными подходами, обеспечивая оперативность, точность локализации и объективность. Разработанная кон-

цепция программно-аппаратного комплекса, интегрирующая интеллектуальные счетчики, аналитическую серверную платформу и клиентские приложения, позволяет решать двуединую задачу: минимизировать коммерческие потери энергокомпаний за счет борьбы с хищениями и способствовать оптимизации затрат добросовестных потребителей. Дальнейшим развитием работы может стать совершенствование алгоритмов анализа с применением методов машинного обучения для более точной классификации типов аномалий и снижения количества ложных срабатываний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Актуальные проблемы энергетики : материалы 63-й научно-технической конференции студентов, магистрантов и аспирантов (апрель 2007 года) / ред. С.М. Силюк [и др.]. – Минск: БНТУ, 2008. – 358 с.: ил. – Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/112448>. – В надзаг.: Белорусский национальный технический университет, Энергетический факультет.
2. Энергосбережение и энергетический менеджмент : учеб. пособие для вузов / А.А. Андрижинский, В.И. Володин. - 2-е изд., испр. - Минск : Вышэйшая школа, 2005. – 294 с.
3. Атомная энергетика XXI века : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Ядерная энергетика и теплофизика» / Б.А. Габараев [и др.]. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Москва: МЭИ, 2020. – 398 с.: ил., цв. ил., табл., схемы.
4. Березовский, Н. И. Технология энергосбережения: [учебное пособие для вузов по специальности «Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент»] / Н.И. Березовский, С.Н. Березовский, Е. К. Костюкович; Белорусский институт правоведения. – Минск: БИП-С Плюс, 2007. – 151 с.: ил.

НОВЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ КОЛЕСНОЙ И ГУСЕНИЧНОЙ ТЕХНИКИ

УДК 629.3.014

Котов Андрей Алексеевич, ст. преподаватель кафедры «Машиностроение, энергетика и автомобильный транспорт» РИ(ф)МПУ, vnret@yandex.ru

Ремюнских Вячеслав Николаевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Машиностроение, энергетика и автомобильный транспорт» РИ(ф)МПУ, vnret@yandex.ru, SPIN 9291-5834

Титлов Александр Валерьевич, студент РИ(ф)МПУ, vnret@yandex.ru

Научный руководитель:

Метик Владимир Викторович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Машиностроение, энергетика и автомобильный транспорт» РИ(ф)МПУ, vnret@yandex.ru, SPIN 5527-5712

ДОРАБОТКА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ ОПАСНЫХ ГРУЗОВ

Аннотация: рассмотрены вопросы доработки транспортных средств для безопасной перевозки опасных грузов. Описаны основные направления модификации автомобилей, включая усиление конструкции, использование негорючих материалов, установку систем пожаротушения и другие меры. Подчёркивается необходимость сертификации всех изменений и проверки квалификации водителя. Это способствует снижению рисков аварий и защите окружающей среды, что становится важным фактором успешного функционирования экономики и охраны интересов общества.

Ключевые слова: транспортные средства, доработка, опасные грузы.

Перевозка опасных грузов – это сложный и крайне ответственный процесс, который требует тщательного соблюдения всех правил и норм безопасности, установленных на международном и национальном уровнях. Это связано с тем, что такие грузы могут представлять серьёзную угрозу для здоровья людей, окружающей среды и имущества. Один из ключевых аспектов обеспечения безопасности при транспортировке опасных материалов – это правильная доработка транспортных средств, специально адаптированных для этих целей. Не каждое транспортное средство пригодно

для перевозки взрывчатых веществ, легковоспламеняющихся жидкостей, токсичных материалов или радиоактивных веществ [1, 2].

Для безопасной перевозки таких грузов необходимы специальные модификации автомобиля, которые включают в себя установку дополнительного оборудования и систем безопасности [1]. Это может включать в себя усиленную изоляцию, специальные резервуары и контейнеры, системы пожаротушения, а также устройства для предотвращения утечек и разливов. Также важно, чтобы водитель транспортного средства был хорошо обучен и имел необходимые сертификаты для работы с опасными грузами.

Специальная подготовка и модификация автомобиля играют решающую роль в предотвращении аварий, минимизации рисков для жизни и здоровья людей, а также в защите окружающей среды. В случае аварии правильно доработанное транспортное средство может значительно снизить вероятность серьёзных последствий, таких как взрывы, пожары или утечки токсичных веществ. Это также помогает предотвратить загрязнение почвы, воды и воздуха, что особенно важно в условиях растущей экологической обеспокоенности.

Таким образом, доработка транспортных средств для перевозки опасных грузов – это важный шаг на пути к обеспечению безопасности и экологической устойчивости. Этот процесс требует комплексного подхода, включающего в себя технические, организационные и образовательные меры. Только так можно гарантировать, что опасные грузы будут доставлены до места назначения без риска для жизни и здоровья людей и окружающей среды.



Рисунок 1 – Автомобиль для перевозки опасных грузов

Опасные грузы представляют собой категорию материалов, обладающих уникальными физико-химическими характеристиками, которые могут представлять значительную угрозу при не-надлежащем обращении или транспортировке. Эти характеристики включают:

- легковоспламеняемость, характеризующаяся высокой вероятностью возгорания и потенциальной детонацией;
- токсичность, выражающуюся в способности вызывать серьезные повреждения здоровья человека и животных при утечке, что может привести к острым и хроническим отравлениям;
- коррозионную активность, представляющую собой способность разрушать различные материалы, включая металлы, полимеры и другие вещества, что может привести к аварийным ситуациям и повреждениям инфраструктуры;
- радиоактивность, характеризующуюся наличием ионизирующего излучения, которое может вызвать радиационные поражения и долгосрочные последствия для здоровья;
- взрывчатость, представляющую собой высокую вероятность детонации при определенных условиях, что может привести к значительным разрушениям и жертвам.

Таким образом, опасные грузы требуют строгого соблюдения мер предосторожности и специализированных методов обращения для обеспечения безопасности транспортировки и хранения.

Транспортные средства, выпускаемые в стандартной комплектации, не обеспечивают должного уровня защиты при перевозке опасных и специальных грузов. Это связано с отсутствием интегрированных систем и конструктивных решений, способных эффективно противостоять различным рискам. В связи с этим возникает острая необходимость модернизации транспортных средств для минимизации потенциальных угроз и обеспечения максимальной безопасности при перевозке.

Модернизация транспортных средств должна включать внедрение передовых систем безопасности. К ним относятся системы видеонаблюдения, которые позволяют контролировать ситуацию на дороге и вокруг транспортного средства, а также датчики движения, фиксирующие любые изменения в окружающей среде. Антиблокировочные системы (ABS) предотвращают блокировку колес при торможении, что способствует более эффективному замедлению и снижению вероятности заноса.

Кроме того, модернизация должна предусматривать улучшение конструктивных характеристик транспортных средств. Это включает повышение их устойчивости и ударопрочности, что особенно важно при перевозке грузов и пассажиров в условиях повышенной нагрузки. Усиленные рамы, более прочные стекла и усовершенствованные кузовные элементы снижают риск повреждений при столкновениях и других аварийных ситуациях.

Эти меры направлены на формирование более надежной и защищенной транспортной инфраструктуры. Снижение аварийности и повышение уровня безопасности дорожного движения являются ключевыми результатами модернизации. Это достигается за счет улучшения управляемости транспортных средств, повышения их устойчивости к внешним воздействиям и обеспечения более точного контроля за ситуацией на дороге.

Модернизация транспортных средств также имеет экономическое значение. Снижение аварийности приводит к уменьшению затрат на ремонт и восстановление транспортных средств, а также к снижению страховых выплат. Это, в свою очередь, способствует снижению себестоимости перевозок и повышению конкурентоспособности транспортных компаний.

Таким образом, модернизация транспортных средств является комплексной задачей, включающей технические, экономические и экологические аспекты. Это делает модернизацию транспортных средств стратегически важным направлением развития транспортной отрасли, способствующим устойчивому и безопасному развитию транспортной инфраструктуры.

Доработка транспортных средств, предназначенных для перевозки опасных грузов, представляет собой сложный и многогранный процесс, включающий в себя широкий спектр модификаций, направленных на повышение уровня безопасности, надежности и соответствие нормативным требованиям. Данный процесс требует тщательного анализа и учета множества факторов, включая физико-химические свойства перевозимых веществ, условия эксплуатации и потенциальные риски. Ключевые направления модификации транспортных средств для перевозки опасных грузов, включают конструктивные изменения, использование специализированных материалов, инженерные решения и системы мониторинга [2, 4, 5]. Они включают в себя следующие основные направления.

1. Усиление конструкции. Одним из первостепенных аспектов модификации является усиление конструкции транспортного средства. Это необходимо для предотвращения деформации и повреждений в случае столкновений, опрокидывания или иных аварийных ситуаций. Конструктивные изменения включают в себя увеличение толщины металлических элементов кузова, использование высокопрочных материалов и внедрение дополнительных ребер жесткости. Такие меры обеспечивают сохранение целостности транспортного средства и минимизируют риск возникновения вторичных повреждений, что, в свою очередь, способствует повышению безопасности как груза, так и водителя.

2. Использование негорючих материалов. Применение негорючих материалов в отделке кузова и внутренних элементах транспортного средства является критически важным аспектом обеспечения пожарной безопасности. Материалы, обладающие низкой воспламеняемостью, существенно снижают риск возгорания при воздействии открытого огня или искр. Это особенно актуально для перевозки легковоспламеняющихся и горючих веществ, где даже незначительное повышение температуры может привести к катастрофическим последствиям.

3. Герметизация грузового отсека. Герметизация грузового отсека является неотъемлемой частью комплекса мер по обеспечению безопасности транспортировки опасных грузов. Полная герметичность предотвращает утечку опасных веществ, что минимизирует риск загрязнения окружающей среды и обеспечивает сохранность груза. Для достижения герметичности применяются специализированные уплотнители, герметизирующие составы и системы контроля давления.

4. Вентиляционные системы. Специальные вентиляционные системы предназначены для эффективного удаления паров и газов, обеспечивая безопасные условия труда водителя, безопасную транспортировку и предотвращая образование взрывоопасных смесей. Эти системы работают по принципу создания направленного потока воздуха, который удаляет вредные вещества, предотвращая их накопление и возможные аварийные ситуации. Они оснащены фильтрами и абсорбентами, которые улавливают и нейтрализуют опасные компоненты, что особенно важно при транспортировке химических компонентов, легковоспламеняющихся и токсичных материалов [3]. Эффективная вентиляция грузового отсека играет ключевую роль в обеспечении безопасных условий труда водителя и предотвра-

щении образования взрывоопасных смесей. Специальные вентиляционные системы разработаны с учетом специфики перевозимых грузов и предназначены для удаления паров и газов.

5. Системы пожаротушения. Автоматические или ручные системы пожаротушения являются неотъемлемым элементом обеспечения пожарной безопасности при транспортировке опасных грузов. Эти системы должны соответствовать специфике и характеристикам перевозимого груза, обеспечивая надежную защиту от огня. Они включают в себя датчики дыма, тепловые извещатели, огнетушители и другие компоненты, активирующиеся при возникновении угрозы возгорания. Важно, чтобы такие системы соответствовали международным стандартам безопасности и учитывали все возможные риски, связанные с транспортировкой конкретного вида груза. Это позволяет минимизировать вероятность возникновения пожара и эффективно реагировать на него в случае необходимости.

6. Заземление. Для предотвращения накопления статического электричества, которое может стать причиной возгорания, необходимо обеспечить заземление транспортного средства. Заземление осуществляется путем установки специальных заземляющих устройств, которые нейтрализуют статические заряды, предотвращая их накопление и возникновение искр.

7. Взрывозащищенное исполнение. Все электрические элементы транспортного средства, такие как осветительные приборы, проводка и оборудование, должны быть выполнены в соответствии с требованиями взрывозащиты. Это необходимо для предотвращения возникновения искр, которые могут стать источником воспламенения в потенциально опасных зонах. Взрывозащищенные устройства минимизируют риск возгорания и обеспечивают безопасность при транспортировке взрывоопасных грузов.

8. Отключение аккумулятора. Возможность быстрого и безопасного отключения аккумулятора является критически важным аспектом обеспечения безопасности при транспортировке опасных грузов. Это позволяет предотвратить короткое замыкание и возникновение пожара в случае аварии. Отключение аккумулятора осуществляется путем установки специальных устройств, которые обеспечивают быстрое и надежное отключение электрической цепи.

9. Защита от короткого замыкания. Дополнительные меры защиты электрических цепей, такие как установка предохранителей, автоматических выключателей и реле, предотвра-

щают возникновение короткого замыкания и минимизируют риск возгорания. Это особенно важно при транспортировке электрических и электронных компонентов, а также химических веществ, которые могут стать источником искр.

10. Усиленные тормозные системы. Надежные тормозные системы являются залогом безопасного торможения транспортного средства, особенно при максимальной загрузке и в сложных дорожных условиях. Усиленные тормозные системы должны обладать высокой эффективностью и обеспечивать надежное торможение даже при резких поворотах, внезапных изменениях скорости и в условиях неблагоприятной погоды. Важно использовать высококачественные тормозные системы. Эти системы должны быть способны эффективно справляться с повышенной нагрузкой и сохранять свою работоспособность в различных погодных и дорожных ситуациях. Это гарантирует, что водитель сможет контролировать автомобиль и избежать аварийных ситуаций, обеспечивая максимальную безопасность на дороге.

11. Системы крепления груза. Надежные и прочные системы крепления груза предотвращают его смещение во время движения, обеспечивая сохранность груза и безопасность транспортного средства. Системы крепления включают в себя различные типы фиксаторов, ремней, цепей и других устройств, которые надежно удерживают груз на месте.

12. Оборудование для локализации утечек. Для оперативного устранения утечек опасных веществ необходимо использовать специализированное оборудование, такое как герметизирующие материалы, инструменты для ликвидации утечек и системы контроля. Это позволяет минимизировать риск загрязнения окружающей среды и обеспечить безопасность транспортировки.

13. Системы мониторинга. Системы мониторинга, включающие GPS-трекеры, датчики температуры, давления и другие устройства, позволяют контролировать состояние груза и транспортного средства в режиме реального времени. Это обеспечивает своевременное выявление и устранение возможных проблем, а также повышает уровень безопасности при транспортировке опасных грузов.

14. Маркировка и знаки опасности. Маркировка транспортного средства и груза в соответствии с международными и национальными стандартами является важным элементом обеспечения безопасности. Знаки опасности, нанесенные на транспортное средство и груз,

информируют о характере перевозимого вещества и требуют соблюдения определенных мер предосторожности при транспортировке.

15. Огнетушители. Для безопасной транспортировки различных грузов необходимо использовать специальные виды огнетушителей, которые соответствуют классу опасности перевозимого вещества. Это позволяет эффективно предотвратить возгорание и минимизировать риски в случае возникновения пожара. Важно учитывать, что каждый класс опасности требует определенных типов огнетушителей с соответствующими характеристиками, такими как тип огнетушащего вещества и конструкция устройства. Например, для перевозки легковоспламеняющихся жидкостей подойдут огнетушители с зарядом углекислого газа или пены, а для транспортировки химических веществ, выделяющих токсичные пары, потребуются огнетушители с порошковым составом, нейтрализующим химические реакции. Таким образом, правильный выбор огнетушителя в зависимости от класса опасности груза является ключевым фактором для обеспечения безопасности на всех этапах транспортировки.

16. Аварийные комплекты. Аварийные комплекты, включающие средства первой помощи, индивидуальные средства защиты (СИЗ) и другие устройства, предназначены для оперативного реагирования в случае возникновения чрезвычайной ситуации. Это позволяет обеспечить безопасность водителя и сопровождающего персонала, а также минимизировать последствия аварии.

17. Средства связи. Надежные средства связи, такие как радиостанции, мобильные телефоны и спутниковые системы, обеспечивают оперативное информирование в случае экстренных ситуаций. Это позволяет быстро связаться с аварийными службами и принять необходимые меры для обеспечения безопасности.

18. Документальное оформление и сертификация. Все доработки, проведенные на транспортном средстве для перевозки опасных грузов, должны быть документально оформлены и прошли соответствующую сертификацию. Это включает в себя технический осмотр, проверку соответствия установленным стандартам и получение необходимых документов, подтверждающих соответствие транспортного средства требованиям безопасности.

В процессе подготовки документов проверяется техническое состояние транспортного средства, его оборудование и системы, а также соответствие правилам и нормам, регулирующим

перевозку опасных грузов. Это включает оценку конструкции кузова, наличие и исправность систем пожаротушения, аварийного сброса груза и других элементов, обеспечивающих безопасность в случае возникновения непредвиденных ситуаций на дороге.

Кроме того, требуется подтверждение квалификации водителя, который будет управлять транспортным средством. Водитель должен пройти специальное обучение и получить соответствующие разрешения, подтверждающие его способность безопасно управлять автомобилем при перевозке опасных грузов.

Таким образом, получение документов, подтверждающих безопасность и пригодность транспортного средства, является важным этапом, который обеспечивает защиту жизни и здоровья людей, а также сохранность окружающей среды при перевозке опасных грузов.

Внесение изменений в регистрационные документы – это процедура официального обновления данных в документации на транспортное средство, отражающая все внесённые модификации. Этот процесс необходим для обеспечения юридической чистоты и соответствия автомобиля действующим нормам и требованиям. Изменения могут касаться различных аспектов, таких как установка дополнительного оборудования, изменение цвета кузова, модернизация двигателя или замена других ключевых компонентов. Важно, чтобы все изменения были документально зафиксированы и согласованы с соответствующими государственными органами.

Доработка транспортных средств для перевозки опасных грузов является важным и многоаспектным процессом, требующим тщательного планирования и реализации. Этот процесс включает в себя множество этапов и учитывает различные факторы, такие как технические характеристики транспортных средств, требования нормативных документов, а также специфические особенности перевозимых грузов. Применение современных технологий и инновационных решений позволяет значительно повысить уровень безопасности перевозок, минимизировать риски аварий и их последствий, а также обеспечить полное соответствие транспортных средств установленным стандартам и регламентам.

Модернизация транспортных средств для перевозки опасных грузов способствует не только повышению безопасности, но и защите жизни и здоровья людей и окружающей среды. В условиях роста объёмов перевозок и увеличения числа опасных грузов, таких как химикаты, взрывчатые

вещества, радиоактивные материалы и другие, обеспечение высокого уровня безопасности становится критически важным. Современные системы контроля и мониторинга, усиленная конструкция транспортных средств, использование новых материалов и технологий позволяют существенно снизить вероятность инцидентов и минимизировать их возможные последствия.

Эффективная реализация мер по доработке транспортных средств способствует созданию более надёжной и устойчивой логистической системы для перевозки опасных грузов. Это включает в себя не только технические аспекты, но и организационные меры, такие как обучение персонала, разработка и внедрение процедур безопасности, а также постоянный контроль и аудит. Комплексный подход к модернизации транспортных средств и оптимизация логистических процессов позволяет обеспечить высокий уровень безопасности и эффективности перевозок, что в конечном итоге способствует стабильности и развитию транспортной инфраструктуры.

Таким образом, доработка транспортных средств для перевозки опасных грузов играет ключевую роль в обеспечении безопасности и устойчивости логистической системы. Этот процесс требует значительных усилий и инвестиций, но в долгосрочной перспективе он приносит ощутимые выгоды, включая снижение рисков аварий, защиту окружающей среды и повышение доверия со стороны клиентов и партнёров. В условиях глобализации и увеличения объёмов международной торговли, обеспечение высокого уровня безопасности перевозок опасных грузов становится важным фактором успешного функционирования экономики и защиты интересов общества.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 33997-2016. Межгосударственный стандарт. Колесные транспортные средства. Требования к безопасности в эксплуатации и методы проверки.
- Повышение эффективности использования транспортно-технологических машин. Ретюнских В.Н., Кирюшин И.Н. В книге: Актуальные вопросы тылового обеспечения угловоно-исполнительной системы. Сборник тезисов выступлений и докладов участников Всероссийского научно-практического круглого стола. 2019. С. 95-97.
- Результаты испытания устройства для очистки отработавших газов двигателя внутреннего сгорания. Колесников В.П., Кирюшин И.Н.,

Котов А.А., Пашуков С.А., Ретюнских В.Н., Аникин Н.В. Грузовик. 2020. № 3. С. 11-15.

4. Информационная культура и информационная компетентность в современном обществе. Ретюнских В.Н., Судакова Г.Ю., Минат В.Н. В сборнике: Донецкие чтения 2019: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности. Материалы IV Международной научной

конференции под общей редакцией проф. С.В. Беспаловой. 2019. С. 350-352.

5. Использование информационных технологий в преподавании инженерных дисциплин. Ретюнских В.Н., Судакова Г.Ю., Минат В.Н. В сборнике: Донецкие чтения 2019: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности. материалы IV Международной научной конференции. 2019. С. 246-248.

УДК 629.3.014

Метик Владимир Викторович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Машиностроение, энергетика и автомобильный транспорт» РИ(ф)МПУ, vnret@yandex.ru, SPIN 5527-5712

Котов Андрей Алексеевич, ст. преподаватель кафедры «Машиностроение, энергетика и автомобильный транспорт» РИ(ф)МПУ, vnret@yandex.ru

Титлов Александр Валерьевич, студент РИ(ф)МПУ, vnret@yandex.ru

Научный руководитель:

Ретюнских Вячеслав Николаевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Машиностроение, энергетика и автомобильный транспорт» РИ(ф)МПУ, vnret@yandex.ru, SPIN 9291-5834

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАЩИТЫ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Аннотация: представлена технология электроосаждения защитных покрытий, которая позволяет создавать равномерные, прочные и устойчивые покрытия на различных деталях. Описаны преимущества метода, включая равномерность покрытия, высокую адгезию, экономичность и экологичность. Указаны области применения в транспортной промышленности. Перечислены пути повышения эффективности технологии, включая разработку новых материалов, оптимизацию параметров процесса и комбинированные методы защиты.

Ключевые слова: электроосаждение, защитные покрытия, детали транспортных средств.

В условиях современной урбанистической среды, где транспортные средства подвергаются

комплексному воздействию агрессивных экологических факторов, включая атмосферные осадки, химическое загрязнение, механические повреждения и термические нагрузки, обеспечение защиты их конструктивных элементов от процессов коррозии и износа приобретает первостепенное значение.

Коррозионные процессы, инициируемые химическими и электрохимическими реакциями, а также механическими факторами, существенно снижают эксплуатационные характеристики транспортных средств, что влечет за собой экономические потери и необходимость в регулярном техническом обслуживании. Износ, обусловленный абразивным воздействием дорожной инфраструктуры, вибрационными нагрузками и усталостными явлениями, приводит к деградации материалов, снижению прочности и надежности конструкций, что, в свою очередь, повышает риск аварийных ситуаций и требует более частого ремонта.

Таким образом, разработка и внедрение инновационных методов защиты транспортных средств от коррозионных и абразивных воздействий представляют собой актуальную научную и инженерную задачу, требующую междисциплинарного подхода и интеграции знаний из области материаловедения, химии, физики, механики и инженерии. В условиях глобализации и ужесточения экологических стандартов, данная проблема приобретает особую значимость, поскольку от ее решения зависит не только экономическая эффективность эксплуатации транспортных средств, но и экологическая безопасность окружающей среды. Электроосаждение защитных покрытий является одним из наиболее эффективных и инновационных методов решения этой проблемы. Этот технологический процесс позволяет создавать тонкие, равномерные и высокоустойчивые слои, которые значительно продлевают срок службы деталей и обеспечивают их стабильную и надежную работу.

Электроосаждение покрытий – это передовой метод нанесения металлических или неметаллических материалов на поверхность изделий с использованием электрического тока. Этот процесс основан на явлении электролиза, при котором ионы металла (катионы) мигрируют через электролитический раствор к катоду, где под воздействием электрического поля происходит их восстановление (редукция). В результате на поверхности изделия формируется защитный слой с заданными характеристиками.

Технология электроосаждения обладает рядом преимуществ, которые делают её востребованной в различных отраслях промышленности. Во-первых, она позволяет точно контролировать параметры покрытия, такие как толщина, химический состав и структура. Это достигается за счёт регулирования силы тока, времени электролиза и состава электролита. Во-вторых, электроосаждение обеспечивает высокую адгезию покрытия к основному материалу, что повышает долговечность и устойчивость изделий к внешним воздействиям.

Существует несколько видов электроосаждения, включая катодное и анодное. Катодное электроосаждение используется для нанесения металлических покрытий, таких как цинк, никель, медь и хром. Анодное электроосаждение применяется для создания оксидных плёнок на поверхности изделий, что придаёт им дополнительные свойства, такие как коррозионная стойкость и износостойкость.

Применение электроосаждения охватывает широкий спектр отраслей, включая автомобилестроение, авиастроение, машиностроение, электротехнику и электронику. В автомобилестроении эта технология используется для защиты кузова от коррозии, улучшения внешнего вида и придания ему блеска. В авиастроении электроосаждение применяется для повышения прочности и долговечности металлических конструкций. В электронике и электротехнике метод используется для нанесения проводящих и изолирующих покрытий на печатные платы, контакты и другие элементы.

Кроме того, электроосаждение позволяет создавать покрытия с уникальными физико-химическими свойствами, такими как высокая твёрдость, износостойкость, устойчивость к химическим воздействиям и механическим повреждениям. Это открывает новые возможности для разработки материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками, которые находят применение в экстремальных условиях.

Таким образом, электроосаждение покрытий является важным и перспективным направлением в области материаловедения и технологий нанесения покрытий. Благодаря своей точности, универсальности и возможности создания материалов с заданными свойствами, эта технология продолжает активно развиваться и находить широкое применение в различных отраслях промышленности.

Одним из ключевых преимуществ электроосаждения является его способность создавать равномерные покрытия, что особенно важно для сложных геометрических форм и мелких деталей. Это обеспечивает высокую адгезию покрытия к поверхности и предотвращает его отслаивание или растрескивание. Кроме того, электроосажденные покрытия обладают высокой прочностью и устойчивостью к механическим воздействиям, что делает их идеальными для использования в условиях повышенных нагрузок и экстремальных температур.

Современные методы электроосаждения также позволяют создавать многофункциональные покрытия, сочетающие в себе различные свойства, такие как коррозионная стойкость, износостойкость, электропроводность и декоративные качества. Это открывает новые возможности для применения технологии в различных отраслях промышленности, включая автомобилестроение, авиастроение, судостроение и производство медицинского оборудования.

Таким образом, электроосаждение (рис.1) защитных покрытий представляет собой высокоэффективное и перспективное решение для продления срока службы транспортных средств и других металлических изделий. Эта технология не только обеспечивает надежную защиту от коррозии и износа, но и позволяет создавать материалы с уникальными характеристиками, отвечающими самым высоким требованиям современного производства.

Электроосаждение, также известное как электрофорезное осаждение (EPD), представляет собой метод нанесения тонких покрытий на проводящие поверхности с использованием электрического поля. В процессе электроосаждения частицы из коллоидной суспензии перемещаются к электроду под воздействием электрического поля, что приводит к их осаждению на поверхности. Этот метод находит широкое применение в различных отраслях, включая транспортную промышленность, где он используется для нанесения лакокрасочных покрытий на кузова автомобилей, детали ходовой части, двигатели и другие

важные компоненты. Электроосаждение позволяет создавать прочные и долговечные покрытия, обеспечивая надежную защиту от коррозии и внешних воздействий. Благодаря своей эффективности и точности, этот метод стал неотъемлемой частью современных производственных процессов.



Рисунок 1 – Ванны для электроосаждения защитного покрытия на детали

Преимущества электроосаждения для защиты деталей транспортных средств:

- равномерность покрытия. Электроосаждение обеспечивает равномерное покрытие даже на деталях сложной формы, включая внутренние полости и труднодоступные участки. Это достигается благодаря тому, что электрическое поле проникает во все области, обеспечивая равномерное осаждение частиц;

- высокая адгезия. Покрытия, полученные методом электроосаждения, обладают высокой адгезией к подложке, что обеспечивает их долговечность и устойчивость к механическим воздействиям;

- экономичность. Электроосаждение позволяет минимизировать потери материала, так как избыток суспензии может быть возвращен в ванну для повторного использования. Кроме того, процесс требует относительно небольшого количества энергии;

- экологичность. Современные электроосаждаемые материалы часто являются водорастворимыми, что снижает выбросы вредных органических соединений (VOC) в атмосферу.

Улучшенные антикоррозионные свойства: электроосаждаемые покрытия обеспечивают эффективную защиту от коррозии, предотвращая проникновение влаги и агрессивных веществ к поверхности металла.

Возможность нанесения многослойных покрытий: электроосаждение позволяет создавать многослойные покрытия с различными функциональными свойствами, например, антикоррозионные, износостойкие и декоративные.

Электроосаждение легко автоматизируется, что позволяет повысить производительность и снизить затраты на рабочую силу.

Применение электроосаждения при производстве транспортных средств играет важную роль.

Электроосаждение широко применяется для защиты различных деталей транспортных средств, включая:

- кузова автомобилей: электроосаждение является основным методом нанесения грунтовки на кузова автомобилей, обеспечивая защиту от коррозии и улучшая адгезию последующих слоев краски;

- детали подвески: амортизаторы, пружины, рычаги и другие детали подвески подвергаются постоянному воздействию влаги, грязи и солей. Электроосаждение обеспечивает надежную защиту этих деталей от коррозии и износа;

- двигатели: блоки цилиндров, головки блоков цилиндров и другие детали двигателей могут быть защищены от коррозии и износа с помощью электроосаждаемых покрытий;

- тормозные системы: тормозные диски, суппорты и другие детали тормозных систем также могут быть защищены от коррозии с помощью электроосаждения;

- элементы выхлопной системы: трубы, глушители и другие компоненты выхлопной системы подвергаются воздействию высоких температур и агрессивных газов, электроосаждаемые покрытия могут повысить их коррозионную стойкость и продлить срок службы;

- колесные диски: электроосаждение позволяет наносить как защитные, так и декоративные покрытия на колесные диски, придавая им привлекательный внешний вид и защищая от коррозии;

- компоненты шасси: шасси автомобиля включает в себя множество ключевых компонентов, таких как рамы, балки и кронштейны. Эти элементы играют важную роль в обеспечении устойчивости и управляемости транспортного средства. Для продления срока службы и поддер-

жания их функциональности необходимо защищать их от коррозии и механических повреждений. Современные технологии анткоррозийной обработки (рис. 2) и использование прочных материалов помогают предотвратить разрушение этих деталей. Регулярное техническое обслуживание и своевременный ремонт также способствуют сохранению их надежности и эффективности. Таким образом, защита шасси является важным аспектом поддержания безопасности и долговечности автомобиля.



Рисунок 2 – Ванны для покрытия осей грузовых автомобилей защитным слоем

Несмотря на значительные преимущества и высокую эффективность метода электроосаждения для нанесения покрытий на детали транспортных средств, существует ряд направлений, которые могут способствовать дальнейшему улучшению этого процесса и повышению его защитных свойств:

- разработка новых материалов: исследования в области разработки новых электроосаждаемых материалов с улучшенными характеристиками, такими как повышенная износостойкость, термостойкость, химическая стабильность и способность к самовосстановлению, представляют собой актуальное и перспективное направление научных и технологических разработок. Эти материалы находят широкое применение в различных отраслях промышленности, включая машиностроение, авиастроение, энергетику и химическую промышленность;

- одним из ключевых направлений исследований является интеграция наночастиц, керамических компонентов и полимерных соединений в состав покрытий. Наночастицы, благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам, значительно повышают эксплуатационные характеристики материалов, такие как прочность, твердость и устойчивость к износу. Керамические добавки улучшают термическую стабильность и химическую стойкость покрытий, что делает их пригодными для использования

в экстремальных условиях. Полимеры, в свою очередь, придают материалам эластичность и адгезию к различным поверхностям, что расширяет их функциональные возможности;

- комбинированное использование этих компонентов позволяет создавать многофункциональные покрытия, обладающие комплексными свойствами, такими как высокая износостойкость, устойчивость к коррозии, способность к восстановлению после повреждений и улучшенные механические характеристики. Это открывает новые возможности для применения покрытий в условиях интенсивного износа, высоких температур и агрессивной химической среды;

- кроме того, разработка самовосстанавливающихся покрытий, способных восстанавливать свою структуру и свойства после механических повреждений или воздействия химических веществ, является важным шагом на пути к созданию материалов нового поколения. Такие покрытия находят применение в условиях, где традиционные материалы быстро теряют свои эксплуатационные характеристики, что приводит к необходимости их частой замены и увеличению затрат на обслуживание.

Таким образом, интеграция нанотехнологий, керамических материалов и полимеров в процесс создания электроосаждаемых покрытий открывает широкие перспективы для улучшения их эксплуатационных свойств и расширения областей применения. Это направление исследований является междисциплинарным и требует совместных усилий специалистов в области материаловедения, химии, физики и инженерии для достижения прорывных результатов.

Оптимизация параметров процесса: тщательный подбор концентрации частиц в суспензии, напряжения, времени осаждения, температуры и pH ванны позволяет добиться максимальной равномерности, плотности и адгезии покрытия. Использование современных систем контроля и автоматизации процесса играет ключевую роль в достижении стабильных и воспроизводимых результатов.

Предварительная подготовка поверхности: качество подготовки поверхности детали перед электроосаждением имеет решающее значение для адгезии и долговечности покрытия. Разработка более эффективных и экологичных методов очистки, обезжикивания и создания микрошероховатости может значительно улучшить конечный результат.

Комбинированные методы защиты: сочетание электроосаждения с другими методами защиты, такими как гальваническое покрытие,

плазменное напыление или нанесение порошковых красок, может создать синергетический эффект, обеспечивая комплексную защиту от различных видов разрушения. Например, электроосаждаемая грунтовка может служить отличной основой для последующего нанесения износостойкого покрытия.

Разработка специализированных покрытий: разработка покрытий, специально адаптированных под уникальные условия эксплуатации и типы деталей, является ключевым аспектом в современных технологиях. Например, для компонентов, функционирующих в экстремальных температурных режимах, создаются покрытия с повышенной термостойкостью. Эти покрытия способны выдерживать значительные перепады температур, обеспечивая надежную защиту и долговечность деталей. В случае, если детали подвергаются интенсивному абразивному износу, применяются покрытия с высокой твердостью. Такие покрытия эффективно противостоят механическому воздействию, увеличивая срок службы изделий и минимизируя необходимость в частой замене или ремонте.

Создание таких специализированных покрытий требует комплексного подхода, включающего анализ условий эксплуатации, выбор подходящих материалов и проведение тщательных испытаний. Это позволяет обеспечить оптимальное сочетание свойств покрытия, таких как износостойкость, устойчивость к коррозии, химическим воздействиям и температурным колебаниям. В результате, производители получают возможность значительно повысить надежность и долговечность своих изделий, что особенно важно в условиях интенсивной эксплуатации и высоких нагрузок.

Мониторинг и контроль качества: внедрение современных технологий неразрушающего контроля в процесс производства и эксплуатации изделий значительно повышает их качество и надёжность. Эти методы позволяют точно оценивать толщину, равномерность и адгезию покрытий, а также выявлять скрытые дефекты. Это, в свою очередь, помогает своевременно принимать меры для предотвращения преждевременного износа и выхода деталей из строя, что особенно важно в условиях интенсивной эксплуатации. Таким образом, использование неразрушающего контроля способствует увеличению срока службы изделий и снижению затрат на их обслуживание и ремонт.

Электроосаждение покрытий продолжает оставаться актуальным и перспективным направлением в области защиты транспортных средств,

а также в других отраслях, таких как машиностроение, энергетика и строительство. Этот метод нанесения покрытий сочетает в себе высокую технологичность, экономичность и эффективность, что делает его востребованным как в производстве, так и в эксплуатации.

Современные исследования и разработки в области электроосаждения направлены на улучшение эксплуатационных характеристик покрытий, таких как адгезия, износостойкость, коррозионная стойкость и декоративные свойства. Использование новых материалов и технологий позволяет создавать покрытия с уникальными свойствами, адаптированными к специфическим условиям эксплуатации. Например, для автомобилей, эксплуатируемых в суровых климатических условиях, разрабатываются покрытия, устойчивые к экстремальным температурам, влаге и механическим воздействиям.

Одним из ключевых преимуществ электроосаждения является возможность автоматизации процесса нанесения покрытий, что значительно повышает производительность и снижает затраты на производство. Автоматизированные системы позволяют контролировать параметры процесса с высокой точностью, обеспечивая стабильное качество покрытий. Это особенно важно в условиях массового производства, где требуется соблюдение высоких стандартов качества.

Электроосаждение также находит применение в создании экологически чистых и безопасных покрытий. Использование экологически безопасных материалов и технологий минимизирует негативное воздействие на окружающую среду, что соответствует современным требованиям устойчивого развития. Это особенно актуально для автомобильного строения, где вопросы экологической безопасности становятся все более значимыми.

Внедрение новых технологий и материалов в процесс электроосаждения открывает широкие возможности для инноваций в различных отраслях. Например, разработка покрытий сnanoструктурными свойствами позволяет значительно улучшить их эксплуатационные характеристики, такие как износостойкость и коррозионная стойкость. Это открывает новые перспективы для создания транспортных средств с длительным сроком службы и минимальными затратами на обслуживание.

Электроосаждение покрытий является важным и динамично развивающимся направлением, которое продолжает играть ключевую роль в защите транспортных средств и других объектов от коррозии и износа. Благодаря постоянным исследованиям и инновациям, этот метод нанесения

покрытий продолжает совершенствоваться, открывая новые возможности для развития промышленности и повышения качества продукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Эл. Сайт SamaS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.samasz.pl/ru/new-products/2020/uslugi-malowania-metoda-ktl> (дата обращения: 30.09.2025).

2. Результаты испытания устройства для очистки отработавших газов двигателя внутреннего сгорания. Колесников В.П., Кирюшин И.Н., Котов А.А., Пашуков С.А., Ретюнских В.Н., Аникин Н.В. Грузовик. – 2020. – № 3. – С. –11-15.

3. Перспективные направления исследования топливоподачи дизельных двигателей транспортно-технологических машин. Кирюшин И.Н.,

Ретюнских В.Н. В книге: Актуальные вопросы тылового обеспечения уголовно-исполнительской системы. Сборник тезисов выступлений и докладов участников Всероссийского научно-практического круглого стола. – 2019. – С. 47-50.

Повышение эффективности использования транспортно-технологических машин. Ретюнских В.Н., Кирюшин И.Н. В книге: Актуальные вопросы тылового обеспечения уголовно-исполнительской системы. Сборник тезисов выступлений и докладов участников Всероссийского научно-практического круглого стола. – 2019. – С. 95-97.

УДК 629.025

Ретюнских Вячеслав Николаевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Машиностроение, энергетика и автомобильный транспорт» РИ(ф)МПУ, vnret@yandex.ru, SPIN 9291-5834

Метик Владимир Викторович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Машиностроение, энергетика и автомобильный транспорт» РИ(ф)МПУ, vnret@yandex.ru, SPIN 5527-5712

Титлов Александр Валерьевич, студент РИ(ф)МПУ, vnret@yandex.ru

РАЗРАБОТКА МЕХАНИЗМА ПОДЪЁМНО-СДВИЖНОЙ ПЕРЕГОРОДКИ ДЛЯ ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ФУРГОНОВ

Аннотация: представлена информация о подъёмно-сдвижных перегородках для изотермических фургонов. Описаны их функции, преимущества и технические особенности. Указано, что подъёмно-сдвижные перегородки обеспечивают разделение пространства, улучшают теплоизоляцию, повышают безопасность и удобство использования грузового объёма. Подчёркивается важность подъёмно-сдвижных перегородок для перевозки различных грузов, требующих поддержания стабильной температуры.

Ключевые слова: Подъёмно-сдвижная перегородка, конструкторская документация, изотермическая перегородка, изотермический фургон.

Подъёмно-сдвижные перегородки (ПСП) – это высокотехнологичные мобильные конструкции, предназначенные для эффективного разделения пространства внутри транспортных средств с повышенной изотермичностью. Такие фургоны часто оснащены холодильно-отопительными установками (ХОУ), поддерживающими необходимый температурный режим для транспортировки различных грузов.

ПСП выполняют несколько важных функций. Во-первых, они обеспечивают эффективное разделение пространства, что позволяет гибко организовать внутреннее пространство фургона. Во-вторых, они улучшают теплоизоляцию, снижая теплопотери и поддерживая стабильную температуру внутри транспортного средства. В-третьих, ПСП повышают безопасность транспортировки, разделяя грузы и предотвращая их смешивание.

Эти перегородки могут быть установлены в различных конфигурациях, включая одно-, двух- и трёхсекционные модели. Это делает их универсальным решением для разных транспортных задач. Например, в рефрижераторных фургонах ПСП используются для разделения груза на секции с разной температурой, а в изотермических фургонах – для организации пространства для различных видов товаров рисунок 1.

Кроме того, подъёмно-сдвижные перегородки способствуют удобству погрузки и разгрузки, обеспечивая лёгкий доступ к разным частям фургона. Это особенно важно для логистических компаний, занимающихся транспортировкой больших объёмов товаров.

Таким образом, подъёмно-сдвижные перегородки являются незаменимым элементом современных транспортных решений, обеспечивая их функциональность, безопасность и удобство использования.

Одним из основных преимуществ ПСП является их способность сохранять стабильную температуру внутри фургона, что особенно важно при перевозке продуктов питания, медикаментов, химических веществ и других грузов, требующих определённых условий хранения. Изотермичность перегородок достигается за счёт использования высококачественных материалов, устойчивых к воздействию внешних факторов, таких как перепады температуры, влажность и механические повреждения.



Рисунок 1 – Подъёмно-сдвижные перегородки в открытом виде

Кроме того, подъёмно-сдвижные механизмы перегородок позволяют легко и быстро изменять конфигурацию внутреннего пространства фургона. Это особенно удобно при необходимости разделить фургон на несколько отдельных зон или, наоборот, объединить их в одно большое пространство. Такая гибкость способствует оптимизации процесса погрузки и разгрузки, а также повышает эффективность использования грузового объёма.

Подъёмно-сдвижные перегородки являются важным элементом современных транспортных решений, обеспечивая надёжную изотермичность и функциональность фургонов. Их использование позволяет повысить качество и безопасность перевозок, а также снизить затраты на организацию логистических процессов.

Основные элементы и их функции подъёмно-сдвижных перегородок включают:

- Пенопластовые панели ПСП предоставляют возможность разделить внутреннее пространство фургона на несколько независимых температурных зон. Это особенно важно при перевозке разнообразных грузов, которые требуют различных температурных режимов. Например,

в одном отсеке можно поддерживать оптимальную температуру для свежих продуктов, а в другом — для замороженных товаров.

Такая система позволяет более эффективно использовать холодильно-отопительное оборудование. Вместо того чтобы поддерживать одинаковую температуру по всему объёму фургона, системы охлаждения и обогрева могут быть направлены на поддержание оптимальных условий только в тех зонах, где это действительно необходимо. Это не только снижает энергозатраты, но и помогает предотвратить порчу грузов, чувствительных к температурным колебаниям.

Кроме того, разделение пространства на термо-зоны повышает удобство управления транспортным средством. Водитель может легко контролировать температуру в каждой зоне, что особенно важно при длительных перевозках. Это также позволяет лучше организовать процесс загрузки и разгрузки, так как водитель точно знает, где находятся товары с определёнными требованиями к температурному режиму.

Таким образом, использование пенопластовых панелей для разделения пространства на термо-зоны является эффективным решением для оптимизации условий перевозки различных грузов. Это позволяет не только обеспечить сохранность продукции, но и повысить общую эффективность логистических операций.

- Одним из ключевых аспектов обеспечения эффективной работы холодильно-отопительной системы является снижение теплопотерь. Когда двери фургона открываются, происходит значительная утечка тепла, что существенно влияет на производительность всей системы. Для решения этой проблемы используются подъёмно-сдвижные перегородки, которые помогают минимизировать теплопотери. Эти перегородки плотно прилегают к стенкам и дверям фургона, создавая герметичное соединение. Это особенно важно для поддержания стабильного температурного режима внутри фургона, что, в свою очередь, позволяет сохранить качество перевозимых продуктов или материалов. Благодаря использованию таких перегородок, можно значительно сократить расходы на электроэнергию и повысить общую энергоэффективность транспортного средства.

- Оптимизация охлаждаемого пространства с помощью ПСП (полупроводниковых охлаждающих систем) – это современное решение, которое значительно повышает эффективность и экономичность транспортных операций. ПСП позволяют гибко регулировать объём охлаждае-

мого пространства в зависимости от текущих потребностей, что особенно актуально при перевозке грузов, занимающих лишь часть внутреннего объёма фургона.

Такая система даёт возможность точно настроить охлаждение, минимизируя потери энергии. Например, если груз занимает лишь половину объёма, система автоматически снижает работу холодильного оборудования, что приводит к существенной экономии электроэнергии. Это не только снижает эксплуатационные расходы, но и уменьшает негативное воздействие на окружающую среду.

Кроме того, ПСП обеспечивают равномерное распределение температуры по всему охлаждаемому пространству, что гарантирует сохранность груза независимо от его размеров и расположения в фургоне. Это особенно важно для продуктов питания, медикаментов и других товаров, требующих строгого температурного режима.

Таким образом, подъёмно-сдвижные перегородки являются важным элементом для обеспечения комфортных условий транспортировки различных грузов в фургонах с усиленной изотермичностью. Они способствуют повышению эффективности работы холодильно-отопительной системы, снижению теплопотерь и оптимизации использования внутреннего пространства.

Основное преимущество таких перегородок заключается в их простоте использования и компактности в открытом положении. Они легко устанавливаются и демонтируются, что позволяет быстро адаптировать пространство под различные нужды. Компактные размеры в раскрытом виде минимизируют занимаемую площадь, что особенно важно для небольших помещений, где каждый квадратный метр имеет значение. Эти перегородки идеально подходят для офисов, квартир и других мест с ограниченной площадью, где требуется гибкость в организации пространства. Благодаря своей универсальности и функциональности, они становятся незаменимым элементом интерьера, обеспечивая комфорт и удобство в повседневной жизни.

Технической особенностью перегородок из пенополистирола ПСП являются подъёмно-сдвижные механизмы, которые перемещаются по роликам и надёжно удерживают перегородку в нужном положении. Для фиксации перегородки используются газовые пружины, расположенные в подъёмно-сдвижных механизмах. Благодаря этому, перегородки можно легко открывать и закрывать, а также регулировать их положение с минимальными усилиями.

Ещё одним важным преимуществом является лёгкость и простота установки. Перегородки из ПСП не требуют сложных монтажных работ и могут быть установлены даже без привлечения профессионалов. Это позволяет значительно сэкономить время и деньги на ремонт и обустройство помещений.

Движение полотна возможно только под углом 45 градусов (± 10 градусов), что обусловлено особенностями запорного механизма. Такое положение обеспечивает оптимальную работу всей системы. Перегородка фиксируется относительно передней стенки благодаря специальным отверстиям в направляющем рельсе, которые позволяют точно и стablyно закрепить её на нужном месте. Эти отверстия обеспечивают высокую точность регулировки положения перегородки, что критически важно для поддержания симметричности и равномерности всей конструкции.

Направляющий рельс рисунок 2 выполняет двойную функцию: он служит опорой для перегородки и одновременно направляет её движение, предотвращая возможные отклонения. Такая система фиксации упрощает процесс монтажа, делая его более быстрым и удобным. Кроме того, она гарантирует долговечность и надежность всей конструкции, что особенно важно в условиях интенсивной эксплуатации.



Рисунок 2 – Направляющий рельс подъёмно-сдвижных перегородок

Эта продуманная система также обеспечивает стабильную работу механизма на протяжении длительного времени. Конструкция продумана до мелочей, что позволяет минимизировать риск поломок и сбоев. Таким образом, благодаря использованию направляющего рельса и специальных отверстий, достигается высокая точность и надежность работы всей системы, что является ключевым фактором для её успешного применения в различных областях.

При анализе конструкции перегородки первостепенное значение имеет её полотно. Одним из

наиболее популярных теплоизоляционных материалов, используемых в перегородках, является экструдированный пенополистирол. Этот материал обеспечивает высокую эффективность теплоизоляции, что особенно важно для создания комфортного микроклимата в помещении. Кроме того, экструдированный пенополистирол отличается высокой долговечностью, что позволяет значительно продлить срок службы перегородки без необходимости частых ремонтов и замен.

Основные преимущества экструдированного пенополистирола включают низкую теплопроводность, что способствует сохранению тепла в помещении в холодное время года и предотвращению перегрева в жаркие дни. Благодаря своей структуре, этот материал обладает высокой устойчивостью к влаге, что делает его подходящим для использования в помещениях с повышенной влажностью. Экструдированный пенополистирол также демонстрирует отличные механические характеристики, такие как прочность на сжатие и устойчивость к деформациям, что гарантирует его надежность и стабильность в течение всего срока эксплуатации.

Таким образом, использование экструдированного пенополистирола в качестве теплоизоляционного материала для перегородок является обоснованным и эффективным решением, которое сочетает в себе высокие технические характеристики, долговечность и экономичность.

Внешний слой перегородки может быть изготовлен из разнообразных материалов, каждый из которых обладает своими уникальными характеристиками и преимуществами. Одним из самых распространённых вариантов являются пластмассовые панели. Они не только придают конструкции эстетичный внешний вид, но и надёжно защищают утеплитель от воздействия влаги, ультрафиолетовых лучей и механических повреждений. Благодаря своей лёгкости и простоте монтажа, такие панели пользуются большой популярностью в строительстве.

Ещё один популярный материал – листы плакмета. Они придают перегородкам дополнительную жёсткость и устойчивость.

В некоторых случаях для создания перегородок с уникальными решениями применяются гибкие (мягкие) слои из ПВХ ткани или её аналогов (рисунок 3). Эти материалы обладают высокой эластичностью, что позволяет формировать перегородки любой формы и конфигурации.

Выбор материала для внешнего слоя перегородки зависит от множества факторов, включая функциональные требования, бюджет проекта и предпочтения заказчика. Независимо от выбранного материала, важно обеспечить качественное

выполнение всех этапов монтажа, чтобы перегородка служила долго и эффективно выполняя свои функции.

Подъёмно-сдвижные перегородки представляют собой высокотехнологичное и многофункциональное решение для изотермических фургонов. Они обеспечивают разделение пространства, улучшают теплоизоляцию, повышают безопасность и удобство транспортировки грузов. Благодаря разнообразию конструкций (одно-, двух- и трёхсекционные) и современным материалам, ПСП универсальны и эффективны для различных задач.



Рисунок 3 – Мягкая перегородка

Основные преимущества включают сохранение стабильной температуры, снижение теплопотерь и оптимизацию энергопотребления. Использование ПСП не только улучшает условия транспортировки, но и способствует экономии ресурсов и снижению воздействия на окружающую среду. Таким образом, подъёмно-сдвижные перегородки играют важную роль в современных транспортных решениях, обеспечивая высокий уровень функциональности, безопасности и энергоэффективности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Эл. Сайт PastoreLombardi [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://pastorelombardi.com/eng/interior_systems_for_trucks/072424591h (дата обращения: 20.09.2025).
2. Эл. Сайт RefExpert [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://refexpert.ru/termo-peregorodki-v-izotermicheskie-furgony> (дата обращения: 20.09.2025).
3. Использование информационных технологий в преподавании инженерных дисциплин Ретюнских В.Н., Судакова Г.Ю., Минат В.Н. В сборнике: Донецкие чтения 2019: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности. материалы IV Международной научной конференции. – 2019. – С. 246-248.
4. Повышение эффективности использования транспортно-технологических машин Ретюнских В.Н., Кирюшин И.Н. В книге: Актуальные вопросы тылового обеспечения уголовно-исполнительной

системы. Сборник тезисов выступлений и докладов участников Всероссийского научно-практического круглого стола. – 2019. – С. 95-97.

5. Инновационные методы организации технологии строительства Ретюнских В.Н., Минат В.Н.

УДК 629.025

Титлов Александр Валерьевич, студент
РИ(ф)МПУ, vnret@yandex.ru

Ретюнских Вячеслав Николаевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Машиностроение, энергетика и автомобильный транспорт»
РИ(ф)МПУ, vnret@yandex.ru,
SPIN 9291-5834

Метик Владимир Викторович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Машиностроение, энергетика и автомобильный транспорт»
РИ(ф)МПУ, vnret@yandex.ru,
SPIN 5527-5712

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТКИ 3D МОДЕЛЕЙ ДЕТАЛЕЙ И СБОРОК ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Аннотация: при проектировании транспортных средств важную роль отводится современным технологиям в создании конструкторской документации и изометрических моделей. Основные функции программ, таких как SolidWorks, играют важную роль в упрощении управления проектами и снижении количества ошибок. Ключевые возможности современных CAD-систем, это влияние на сокращение сроков проектирования, унификацию документации и поддержку удалённой работы. Перспективы развития CAD-технологий – интеграция искусственного интеллекта, дополненной реальности, облачных вычислений и промышленный интернет вещей в транспортном машиностроении.

Ключевые слова: SolidWorks, конструкторская документация, программное обеспечение.

С развитием современных технологий возрастаёт необходимость в передовых методах создания конструкторской документации (КД) и изометрического моделирования для транспортных средств. Это обусловлено тем, что новые проекты становятся всё более сложными и требуют высокой точности и детализации для успешного выполнения. Современные транспортные средства включают в себя множество систем и компонентов, которые должны быть тщательно интегрированы и оптимизированы для обеспечения безопасности,

В сборнике: Проблемы и перспективы развития инженерно-строительной науки и образования. Сборник статей по материалам II Всероссийской научно-практической конференции. Под общей редакцией С.Ф. Сухановой. – 2018. – С. 41-44.

эффективности и соответствия нормативным требованиям.

Использование передовых методов проектирования позволяет инженерам создавать более точные модели, выявлять потенциальные проблемы на ранних стадиях разработки и сокращать время и затраты на производство.

Кроме того, изометрическое моделирование играет ключевую роль в визуализации и анализе компоновки транспортных средств, что особенно важно для оптимизации внутреннего пространства, аэродинамики и эргономики. Это способствует созданию более удобных и функциональных транспортных средств, которые отвечают потребностям пользователей и соответствуют современным тенденциям в области дизайна и технологий.

Многие программы для создания КД имеют схожий набор базовых функций, таких как возможность работы с чертежами, моделями, соединениями и материалами. Они также обычно обладают интуитивно понятным интерфейсом, что позволяет даже новичкам быстро освоиться с программой. Кроме того, многие из них имеют внутренние справочники, которые помогают пользователям находить необходимую информацию.

Некоторые программы также предлагают возможность расширения функционала с помощью макросов. Это позволяет пользователям создавать собственные инструменты и автоматизировать рутинные задачи.

Одним из ярких примеров такой программы является SolidWorks – платформа для разработки конструкторской документации, которая завоевала популярность благодаря своей функциональности и удобству использования.

SolidWorks позволяет создавать сложные трёхмерные модели, что делает её незаменимой для проектирования деталей и узлов. Программа предоставляет широкий спектр возможностей не только для работы с конечными деталями, но и с полуфабрикатами, что позволяет оптимизировать процесс проектирования и сократить время на разработку.

Интерфейс SolidWorks интуитивно понятен и имеет гибкие настройки расположения инструментов. Это позволяет каждому пользователю

настроить рабочее пространство под свои потребности, что повышает эффективность работы и снижает вероятность ошибок.

Программа включает в себя несколько блоков инструментов, таких как работа с чертежами, моделями, соединениями, листовым металлом и инструментами для литейной формы. Это позволяет пользователям выполнять все необходимые задачи в одной среде, что упрощает процесс проектирования и сокращает время на переключение между различными программами.

Одним из ключевых преимуществ SolidWorks является окно «Свойства», где можно задать обозначение, наименование, материал и другие свойства документа. Эти данные автоматически переносятся в чертёж, что позволяет избежать ошибок и сэкономить время.

Кроме того, SolidWorks поддерживает интеграцию с другими программами, такими как AutoCAD и Microsoft Excel, что расширяет возможности пользователей и позволяет им работать с данными из различных источников [1].

Современные системы автоматизированного проектирования стали мощным инструментом для цифрового инжиниринга. Они не только позволяют создавать трёхмерные модели, но и обеспечивают комплексный анализ, автоматическую подготовку документации и интеграцию данных с производственными системами. Рассмотрим основные возможности таких решений.

Основные функции 3D-моделирования включают создание объёмных объектов с помощью математических алгоритмов и визуализацию этих объектов в пространстве для анализа их формы и структуры. Также функции 3D-моделирования позволяют редактировать и модифицировать модели, применяя различные инструменты для изменения геометрии, текстурирования и освещения.

Современные САПР включают набор базовых инструментов для создания и редактирования трёхмерных моделей:

- параметрическое моделирование, этот метод позволяет создавать объекты с управляемыми размерами и взаимосвязями между элементами, при изменении одного параметра автоматически пересчитывается вся геометрия модели, это значительно упрощает процесс проектирования и минимизирует вероятность ошибок;

- твердотельное моделирование, с его помощью можно создавать сложные формы путём объединения, вычитания и пересечения различных геометрических тел, этот метод широко используется для проектирования деталей машин, механизмов и других конструкций, требующих высокой точности;

- поверхностное моделирование, данный подход применяется для создания аэродинамических обводов, эргономичных корпусов и других форм с криволинейными поверхностями, поверхностное моделирование особенно полезно при проектировании объектов, где важна визуальная привлекательность и соответствие строгим эстетическим требованиям.

- ассоциативные связи, эта функция обеспечивает синхронизацию 3D-модели с чертежами, спецификациями и другими проектными документами. При внесении изменений в модель все связанные документы автоматически обновляются, что упрощает процесс управления проектом и минимизирует риск ошибок.

Современные системы автоматизированного проектирования (САПР) играют важную роль в различных отраслях промышленности, обеспечивая высокую точность и эффективность при разработке сложных технических изделий. Одной из ключевых особенностей современных САПР является возможность проектирования сложных изделий как совокупности взаимосвязанных компонентов. Это позволяет значительно повысить эффективность и точность проектирования:

- иерархическая структура, в САПР можно организовать детали и подсборки в виде древовидной схемы, это упрощает навигацию по проекту, позволяет группировать и фильтровать компоненты, а также управлять большими объёмами данных;

- сопряжения, эта функция позволяет накладывать геометрические ограничения на элементы модели, такие как совпадение, параллельность, касание и другие, это обеспечивает точное позиционирование компонентов и помогает избежать ошибок при сборке;

- динамический анализ, современные САПР предоставляют возможность проводить проверку коллизий, зазоров и кинематики движений в реальном времени, это позволяет выявить потенциальные проблемы на ранних стадиях проектирования и предотвратить их появление в производстве;

- конфигурации сборок, функция позволяет создавать различные варианты компоновки изделия с разными наборами компонентов, это особенно полезно при разработке модификаций или для создания семейств изделий с общими базовыми элементами, но разными характеристиками.

Дополнительные возможности САПР позволяют более точно и детально прорабатывать конструкции, оптимизировать их параметры, проводить виртуальные испытания и симуляции для проверки работоспособности и надёжности изделий. Это, в свою очередь, снижает вероятность

ошибок на этапе проектирования, сокращает время разработки и помогает создавать более качественные и инновационные продукты.

Современные САПР предлагают широкий спектр дополнительных возможностей, которые делают их незаменимыми инструментами для инженеров и дизайнеров:

- анализ прочности и жёсткости, с помощью встроенных инструментов можно проводить расчёт напряжений, деформаций и других параметров, что позволяет оценить прочность и надёжность конструкции;
- генеративное проектирование, этот метод позволяет автоматически генерировать множество вариантов конструкций на основе заданных критериев и ограничений. Это значительно ускоряет процесс поиска оптимального решения;
- интеграция с другими системами, современные САПР могут интегрироваться с системами управления жизненным циклом изделия (PLM), системами управления производством (MES) и другими инструментами, что обеспечивает сквозной контроль над проектом на всех этапах его жизненного цикла;
- визуализация и анимация, встроенные инструменты позволяют создавать реалистичные визуализации и анимации, что помогает лучше представить конечный продукт и улучшить коммуникацию с заказчиками и коллегами;
- облачные технологии, многие современные САПР предлагают облачные решения, которые позволяют работать над проектом из любой точки мира, обеспечивают доступ к актуальным версиям документов и упрощают совместную работу над проектом.

В современном мире проектирование играет ключевую роль в транспортном машиностроении. Для облегчения и ускорения этого процесса используются компьютерные системы автоматизированного проектирования (CAD-системы). Современные CAD-системы включают модули, предназначенные для решения различных задач. При этом необходим особый подход, что значительно упрощает и ускоряет процесс проектирования [2, 4]. В этом контексте особенно важно отметить, что современные CAD-системы включают модули, предназначенные для решения узко-специализированных задач. Основные из них:

1. Листовой металл – этот модуль позволяет автоматизировать создание развёрток, гибов и фланцев, учитывая технологические параметры. Он особенно полезен при проектировании изделий из листового металла, так как помогает точно рассчитать необходимые параметры для минимизации отходов и оптимизации производственных процессов.

2. Литьевые формы – данный модуль предназначен для генерации сложных форм, необходимых для литейного производства. Он автоматически создаёт разъёмы, уклоны и стержни, что обеспечивает точное соответствие между моделью и конечной отливкой. Это позволяет сократить время на проектирование и уменьшить количество ошибок.

3. Трубопроводы и кабели – модуль для трассировки коммуникаций помогает автоматизировать процесс прокладки трубопроводов и кабелей. Он позволяет учитывать радиусы изгиба, что важно для правильного монтажа и эксплуатации систем. Это особенно актуально при проектировании инженерных сетей в сложных условиях.

4. Механические передачи – этот модуль предназначен для расчёта и моделирования зубчатых колёс, ременных и цепных приводов. Он позволяет точно определить параметры передачи, такие как передаточное число, крутящий момент и скорость вращения. Это помогает оптимизировать работу механизмов и снизить риск их выхода из строя.

5. Топологическая оптимизация – модуль для создания облегчённых конструкций позволяет автоматически изменять форму и размеры деталей, сохраняя при этом необходимую прочность. Это особенно важно при проектировании изделий, требующих высокой прочности при минимальном весе. Топологическая оптимизация помогает снизить затраты на материалы и улучшить эксплуатационные характеристики изделий.

Анализ и симуляция играют ключевую роль в современном процессе проектирования. Эти инструменты помогают выявить потенциальные проблемы, оптимизировать параметры и улучшить качество конечного продукта. Благодаря интеграции анализа и симуляции, инженеры могут более точно прогнозировать поведение конструкций в различных условиях эксплуатации, что способствует созданию более надежных и эффективных решений [3]. Современные системы автоматизированного проектирования (CAD) оснащены продвинутыми инструментами инженерного анализа, которые позволяют детально исследовать и оценивать конструкции на всех этапах разработки. Основные из них:

1. Расчёт напряжений и деформаций – этот инструмент использует метод конечных элементов (FEM) для оценки прочности конструкции под воздействием различных нагрузок. Он позволяет выявить слабые места и оптимизировать конструкцию для повышения её устойчивости. Это особенно важно при проектировании зданий, мостов и других ответственных сооружений.

2. Термовой анализ – модуль для моделирования распределения температур и тепловых потоков помогает определить, как конструкция будет вести себя в условиях высоки – или низких температур. Это позволяет предотвратить перегрев или переохлаждение деталей, что особенно важно для электронных устройств и систем отопления.

3. Гидро- и газодинамика – инструменты для симуляции потоков жидкостей и газов позволяют оценить, как конструкция будет взаимодействовать с окружающей средой. Это помогает оптимизировать обтекаемость транспортных средств, снизить сопротивление воздуха и улучшить аэродинамические характеристики.

4. Динамический анализ – этот модуль предназначен для исследования движения механизмов с учётом сил трения и инерции. Он позволяет оценить, как конструкция будет вести себя под воздействием динамических нагрузок, таких как вибрации и удары. Это помогает предотвратить поломки и повысить надёжность механизмов.

5. Устойчивость и вибрации – инструменты для определения критических частот и форм колебаний позволяют оценить устойчивость конструкции к вибрациям. Это особенно важно для зданий и сооружений, расположенных в сейсмоопасных зонах или вблизи источников вибраций.

Современные CAD-системы предлагают множество возможностей для автоматизации повседневных задач и интеграции с внешними сервисами и системами. Основные из них:

1. Макросы и скрипты – эти инструменты позволяют записывать последовательности действий для их последующего повторения. Они могут быть написаны на различных языках программирования, таких как VBA (Visual Basic for Applications) или Python, что делает их универсальными и гибкими. Макросы и скрипты помогают ускорить процесс проектирования и снизить вероятность ошибок.

2. API-интерфейсы – инструменты для разработки пользовательских модулей и интеграции с внешними системами позволяют расширить функциональность CAD-систем. Они позволяют автоматизировать обмен данными между различными приложениями, что повышает эффективность работы и улучшает взаимодействие между различными отделами.

3. Шаблоны документов – использование шаблонов позволяет стандартизировать оформление чертежей и спецификаций в соответствии с требованиями ГОСТ или ISO. Это упрощает процесс создания документации и делает её более понятной для всех участников проекта.

4. Библиотеки компонентов – хранение типовых деталей, таких как крепёж, подшипники и электроразъёмы, позволяет быстро находить

и использовать готовые решения. Это снижает время на проектирование и обеспечивает высокое качество готовых изделий.

Совместное использование информации и сотрудничество в 3D-моделировании – это ключевой аспект современной инженерии в транспортном машиностроении. Современные технологии автоматизированного проектирования (CAD) предлагают обширный набор инструментов, которые значительно упрощают обмен данными и организацию командной работы. Эти инструменты позволяют не только создавать точные и детализированные 3D-модели, но и эффективно передавать их между участниками проекта. Эти функции включают:

- импорт и экспорт форматов файлов, что позволяет использовать различные стандарты, такие как STEP, IGES, STL и Parasolid, это обеспечивает совместимость с другими программными платформами и упрощает интеграцию с внешними системами;

- облачные технологии, которые открывают доступ к проектам в реальном времени, обеспечивают версионный контроль и позволяют оставлять комментарии, это особенно важно для удалённых команд и крупных проектов, требующих координации между разными участниками;

- PLM-интеграция, которая позволяет передавать данные в системы управления жизненным циклом изделия, такие как Teamcenter и Windchill, это способствует более эффективному управлению производственными процессами и упрощает обмен информацией между различными этапами разработки;

- визуализация, которая включает создание фотorealистичных изображений и анимаций, эти инструменты незаменимы для презентации проектов клиентам, а также для внутреннего анализа и демонстрации технических решений.

На рынке представлено множество CAD-систем, каждая из которых имеет свои особенности и предназначена для решения специфических задач:

1. SolidWorks – это одна из самых известных CAD-систем, широко используемая в машиностроении, приборостроении и производстве потребительских товаров. Она отличается интуитивно понятным интерфейсом, мощными инструментами для работы со сборками и интеграцией с CAM-модулями. SolidWorks позволяет создавать сложные модели и обеспечивает высокую точность проектирования.

2. Autodesk Inventor – ещё одна популярная система, которая особенно востребована в промышленном оборудовании и автоматизации производства. Её ключевая особенность – глубокая интеграция с AutoCAD, что упрощает переход между различными этапами проектирования.

Autodesk Inventor также предлагает продвинутые инструменты для динамического анализа и симуляции.

3. Siemens NX – это комплексное решение, которое широко используется в авиакосмической и автомобильной отраслях. Siemens NX поддерживает топологическую оптимизацию и предоставляет инструменты для высокоточного проектирования. Он также интегрируется с системами аддитивного производства, что делает его идеальным выбором для современных производственных процессов.

4. Fusion 360 – это облачная CAD-система, которая подходит для малого бизнеса и стартапов. Fusion 360 предлагает встроенные инструменты CAM и CAE, что позволяет проводить анализ и оптимизацию проектов прямо в процессе их создания. Её облачная архитектура обеспечивает доступность с любого устройства и упрощает совместную работу над проектами.

Внедрение современных CAD-систем в производственные процессы проектирования и производства транспортных средств приносит значительные экономические выгоды:

- сокращение сроков проектирования на 40–60%, автоматизация рутинных задач и возможность повторного использования данных позволяют значительно ускорить процесс разработки;

- снижение количества ошибок на этапе производства. виртуальные испытания и анализ моделей помогают выявить и устраниТЬ потенциальные проблемы до начала реального производства;

- унификация документации и соответствие отраслевым стандартам, CAD-системы обеспечивают создание единой базы данных, что упрощает процесс согласования и утверждения документации;

- возможность удалённой работы и коллективного редактирования проектов, это особенно актуально в условиях глобализации и позволяет эффективно управлять проектами, независимо от географического расположения участников.

Будущее CAD-систем обещает быть ещё более захватывающим благодаря интеграции передовых технологий:

- искусственный интеллект открывает новые возможности для автоматической оптимизации форм и генерации дизайна на основе заданных параметров, это позволяет создавать более эффективные и инновационные решения;

- дополненная реальность (AR) предоставляет возможность визуализации моделей в реальном окружении и создания интерактивных инструкций для сборки, это упрощает процесс обучения и повышает точность выполнения задач;

- облачные вычисления позволяют обрабатывать сложные симуляции и анализ на удалённых серверах, что особенно важно для крупных и ресурсоёмких проектов;

- интеграция с интернетом вещей (IoT) обеспечивает передачу параметров моделей в системы мониторинга оборудования, что позволяет оперативно реагировать на изменения и оптимизировать производственные процессы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Эл. сайт SolidWorks [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.solidworks.com/ru> (дата обращения: 20.09.2025).

2. Использование информационных технологий в преподавании инженерных дисциплин. Ретюнских В.Н., Судакова Г.Ю., Минат В.Н. В сборнике: Донецкие чтения 2019: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности. материалы IV Международной научной конференции. –2019. – С. 246-248.

3. Повышение эффективности использования транспортно-технологических машин. Ретюнских В.Н., Кирюшин И.Н. В книге: Актуальные вопросы тылового обеспечения уголовно-исполнительской системы. Сборник тезисов выступлений и докладов участников Всероссийского научно-практического круглого стола. – 2019. – С. 95-97.

4. Инновационные методы организации технологии строительства. Ретюнских В.Н., Минат В.Н. В сборнике: Проблемы и перспективы развития инженерно-строительной науки и образования. Сборник статей по материалам II Всероссийской научно-практической конференции. Под общей редакцией С.Ф. Сухановой. – 2018. – С. 41-44.

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ИНЖЕНЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

УДК 620.92

Официн Сергей Иванович, канд. пед. наук, доцент, доцент кафедры «Машиностроение, энергетика и автомобильный транспорт»
 РИ(ф)МПУ, s.ofitsin@yandex.ru,
 SPIN 6149-3490

Гуреев Максим Михайлович, студент
 РИ(ф)МПУ, gureew.mack@yandex.ru
Костиков Дмитрий Антонович, студент
 РИ(ф)МПУ, mhotak74@gmail.com

КЛЮЧЕВЫЕ АСПЕКТЫ ИНЖЕНЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ В РЯЗАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Аннотация: в статье исследуется взаимосвязь развития энергетики Рязанской области и эволюции инженерного образования. На примере ключевых объектов – от первых электростанций XIX века до современной Рязанской ГРЭС – показано, как технологические вызовы каждого этапа формировали требования к подготовке кадров. Анализируются современные тенденции: цифровизация, внедрение Smart Grid и прогнозной аналитики. Обосновывается необходимость обновления образовательных программ с акцентом на ИТ-компетенции, экологический менеджмент и междисциплинарные навыки для успешного развития энергетического комплекса региона в условиях технологической трансформации.

Ключевые слова: инженерное образование, энергетика Рязанской области, цифровизация энергетики, прогнозная аналитика, ИТ-компетенции.

Энергетическая безопасность является фундаментальным условием социально-экономического развития Рязанской области. Стабильное и надежное энергоснабжение обеспечивает функционирование ключевых отраслей региональной экономики, таких как нефтепереработка, химическая промышленность и машиностроение. Любые перебои в подаче энергии приводят к прямым экономическим потерям, снижению налоговых поступлений и риску остановки производств [1]. С социальной точки зрения энергетическая безопасность гарантирует бесперебойную работу объектов жилищно-коммунального хозяйства,

медицинских и образовательных учреждений, поддерживая приемлемое качество жизни населения. Кроме того, модернизация энергетической инфраструктуры, направленная на повышение её надежности и эффективности, создает высокотехнологичные рабочие места и стимулирует инновационную активность в регионе. Устойчивое развитие Рязанской области напрямую зависит от способности ее энергетического комплекса обеспечивать растущие потребности экономической и социальной сфер.

Современная энергетика сталкивается с двумя ключевыми глобальными вызовами:

- экологический – инженер нового поколения должен не только обеспечивать эффективность, но и минимизировать экологический вред. Это предполагает знание принципов работы оборудования, использующего возобновляемые источники энергии [6], модернизации тепловых электростанций (ТЭС) для снижения выбросов и управления системами экологического мониторинга;

- вызов цифровизации – цифровая трансформация энергетики приводит к появлению новых технологий [5]. Современный специалист должен владеть навыками работы с большими данными (Big Data) и методами искусственного интеллекта (ИИ) для оптимизации режимов работы оборудования.

Учитывая данные вызовы, появляется необходимость в специалистах, способных решать комплексные задачи. В настоящее время инженер-энергетик должен интегрировать технические решения с экологическими требованиями и цифровыми инструментами, управлять проектами в условиях высокой неопределенности. Подготовка таких кадров требует делать акцент в образовательных программах на проектную деятельность, ИТ-грамотность и развитие гибких навыков (soft skills).

Сформулируем цели и задачи исследования.

Цель исследования заключается в комплексном анализе развития энергетики Рязанской области и выявлении на этой основе ключевых компетенций, необходимых современному инженеру-энергетику для успешной работы в условиях технологической трансформации отрасли.

Задачами исследования являются:

- обзор исторических этапов развития энергосистемы Рязанской области; анализ развития

энергетики в Рязанской области: от первых частных электростанций до создания и развития современных электростанций;

- оценка состояния и перспективы энергетического комплекса в современности; анализ текущей структуры генерирующих мощностей, их технологического уровня и роли в региональной и общесистемной энергетике; выявление стратегических перспектив развития отрасли в регионе, включая модернизацию, цифровизацию и экологизацию;

- определение взаимосвязи между технологическими вызовами и содержанием инженерного образования, учитывая развитие технологий в области энергетики;

- формулировка ключевых аспектов подготовки инженерных кадров для энергетики на основе проведенного анализа и с учётом современных требований к компетенциям инженера.

Осуществим исторический обзор развития энергетики в Рязанской области

1. Зарождение энергетики (конец XIX – начало XX вв.)

История развития энергосистемы берет начало с 1895 года. Первую электростанцию в Рязани смонтировал купец Федоров. В том же году купцом Шульгиным были установлены динамомашины, которые освещали торговый дом и часть улицы. Затем стали появляться небольшие частные электростанции, которые вырабатывали ток для освещения одного объекта и прилегающей к нему территории. Всего таких станций насчитывали 5 штук. Первая электроустановка освещала железнодорожный вокзал, вторая – винный склад, третья – усадьбу больницы, четвёртая – витрины магазина на Почтовой улице, а пятая находилась у держателя кроватной мастерской на ул. Пожалостина.

В 1905 году предприниматель Сергей Морозов построил временную электростанцию; она давала свет фонарям на Соборной, Почтовой и Астраханской улицах при помощи угольных ламп – так называемых «свеч Яблочкива». В декабре 1910 года Рязанская Городская Дума дала разрешение построить постоянную электростанцию на ул. Некрасова. В 1911 году станция была полностью построена. Она представляла собой две динамо-машины постоянного тока мощностью по 150 кВт каждая и два керосиновых двигателя для их вращения. Станция давала городу постоянный ток напряжением 100 В. В 1917 году мощность была увеличена до 800 кВт, что позволило наладить уличное электрическое освещение.

2. Советский период: этап централизации и индустриализации (1920-1980 гг.).

Советская эпоха ознаменовала собой качественно новый этап в развитии энергетики Рязанской области, который характеризовался жесткой централизацией, плановым началом и подчинением задач энергетики целям ускоренной индустриализации региона.

В 1922 году Государственная Комиссия по электрификации России приняла решение о постройке Скопинской Центральной Электростанции (ЦЭС), которая обеспечивала электроэнергией сразу два района. Она находилась в паре километров к западу от села Чулково. В первую очередь строилась для обеспечения электрической энергией шахт Побединского месторождения. Тепловая электропроточная (ТЭЦ) проработала вплоть до второй половины 80-ых гг.

В 1930 году по линиям электропередач напряжением 110 кВ и протяженностью около 105 км начала поступать электроэнергия с Каширской ГРЭС, изображённой на рис. 1, до Москвы. Таким образом, объединив Московскую энергосистему к Рязанской. Каширская ГРЭС была торжественно сдана в эксплуатацию 4 июня 1922 года. Первая в стране высоковольтная линия электропередачи (ЛЭП) по ряду причин не отличалась надежностью: качество постройки было очень низким. ЛЭП строилась на деревянных опорах, которые были сделаны из лежальных бревен. На протяжении всей линии заранее разместили несколько монтерских пунктов для оперативного ремонта.



Рисунок 1 – Каширская ГРЭС

Первая межколхозная гидроэлектростанция (ГЭС) на Рязанской земле появилась в селе Кузьминское Рыбновского района (рис. 2). Постановление о ее строительстве было принято 28 ноября 1944 года. Инициатором строительства выступил председатель колхоза им. Ленина В.С. Говорушкин. Несмотря на все тяготы военных лет, Кузьминская ГЭС была построена в срок. В 2011 году было принято решение о нецелесообразности реконструкции существующего гидроузла и строительстве нового, ниже по течению. 16 октября 2015 года был принят в эксплуатацию новый Кузьминский гидроузел.



Рисунок 2 – Кузминская ГЭС

В 1953 году в Рязани началось строительство Дягилевской ТЭЦ (рис. 3). 28 апреля 1958 года был запущен в работу первый энергоблок. В том же году станция начала работать на подмосковном буром угле в постоянном режиме. К 1959 году на ТЭЦ была установлена вторая очередь оборудования, и её мощность выросла до 24 МВт. В последующие годы на Дягилевской ТЭЦ активно велось строительство новых мощностей. Росли промышленность и жилые районы Рязани, для которых требовались тепло и электричество. В 1977 году с пуском очередного парового котла и турбогенератора мощность Дягилевской ТЭЦ достигла максимального на тот момент значения в 134 МВт [2].



Рисунок 3 – Дягилевская ТЭЦ

30 сентября в 1959 году была построена Ново-Рязанская ТЭЦ. Уже ноябрь началось обеспечение электроэнергией и теплом завода химического волокна. В конце 1970 года после пуска

десятого котла и девятого турбоагрегата Ново-Рязанская ТЭЦ (рис. 4) достигла своей проектной мощности, которая составила 400 МВт. После этого в 1971 году началось теплоснабжение микрорайона Дашково-Песочня Рязани.



Рисунок 4 – Ново-Рязанская ТЭЦ

В 1967 году Совет министров СССР дало разрешение на строительство тепловой электростанции на реке Проня. 3 декабря 1973 года турбогенератор №1 Рязанской государственной районной электрической станции (ГРЭС) включен в электрическую сеть страны. В июне 1974 года полностью введена в работу первая очередь ГРЭС, установленная мощность 4 блоков станции достигла 1200 МВт. В 1988 году годовое производство электроэнергии достигло максимальной величины в 16 522 млн кВт · ч.

3. Рассмотрим современное состояние энергетики.

Современный энергетический комплекс Рязанской области представляет собой разноуровневую систему, включающую как крупные генерирующие объекты федерального значения, так и источники локального энергоснабжения (табл. 1) [4]. По состоянию на 2025 год, установленная электрическая мощность электростанций региона составляет порядка 3,8 ГВт.

Таблица 1 – Структура генерирующих мощностей Рязанской области

Объект	Установленная электрическая мощность, МВт	Основной вид топлива	Роль в энергосистеме региона и ключевые потребители [3]
Рязанская ГРЭС	3130	Уголь, природный газ	Крупнейший производитель электроэнергии, работающий на оптовый рынок. Интегрирована в ЕЭС России. Резерв для энергосистемы Центра.
Ново-Рязанская ТЭЦ	400	Природный газ	Обеспечивает энергоснабжение промышленной зоны и теплофикацию города Ново-Рязанский и части Рязани.
Дягилевская ТЭЦ	235	Природный газ	Ключевой источник теплоснабжения и электроснабжения западной части Рязани (Дягилевский промузел).
ГТ ТЭЦ в г. Сасово	18	Природный газ	Обеспечивает энергонезависимость г. Сасово, покрывая локальные потребности в электроэнергии и теплоте.
ГТ ТЭЦ в г. Касимов	18	Природный газ	Решает задачи энергоснабжения г. Касимов, повышая надежность его энергосистемы.

Стратегические перспективы развития электроэнергетики заключаются в модернизации отрасли, повышении эффективности производства и снижении влияния на окружающую среду. Планируется дальнейший перевод энергоблоков Рязанской ГРЭС на природный газ, внедрение современных систем фильтрации. Модернизация ТЭЦ направлена на повышение коэффициента полезного действия (КПД) агрегата. Развитие малой энергетики – строительство газопоршневых и газотурбинных станций малой мощности для повышения надежности энергоснабжения удаленных районов.

Внедрение технологий для оптимизации режимов работы оборудования, управления нагрузкой и сокращения эксплуатационных расходов на примерах: «умные сети» (Smart Grid), цифровые двойники, системы прогнозной аналитики.

Нельзя не отметить связь энергетики с инженерным образованием.

Современная энергетика претерпевает значительную трансформацию, что напрямую влияет на требования к подготовке инженерных кадров. Ключевые изменения связаны с необходимостью овладения междисциплинарными компетенциями, выходящими за рамки традиционных технических знаний.

К техническим компетенциям отнесём: глубокие знания в области традиционной энергетики, понимание принципов работы возобновляемых источников энергии (ВИЭ), владение цифровыми технологиями и ИТ-инструментами, знание экологических стандартов и требований.

К междисциплинарным навыкам отнесём: понимание экономических аспектов энергетики, знание нормативно-правовой базы отрасли экономики.

Практические навыки предусматривают: опыт работы с современным оборудованием, умение принимать решения в условиях неопределенности, навыки межотраслевой коммуникации.

Владение ИТ-инструментами является одним из важнейших навыков для будущих специалистов. Рассмотрим современные информационные системы, которые используются в энергосистемах:

- цифровой двойник – это виртуальная копия физического объекта или процесса энергосистемы, которая постоянно обменивается данными со своим реальным «близнецом» и позволяет моделировать, анализировать и оптимизировать его работу в реальном времени, то есть, система создаёт копию энергосистемы (или её

части) для прогноза аварий, тестирования новых режимов работы без риска для физического оборудования;

- система прогнозной аналитики – это комплекс технологий и методов, которые используют исторические данные, машинное обучение и статистическое моделирование для прогнозирования будущих событий, показателей и тенденций в энергосистеме; она показывает данные с датчиков оборудования, историческую информацию о выработке и потреблении электроэнергии, используется для прогноза спроса на электроэнергию;

- умная сеть Smart Grid – это современная электрическая сеть, которая использует цифровые технологии, двухстороннюю связь и интеллектуальные устройства для эффективного управления производством, передачей, распределением и потреблением электроэнергии [7]. Она передаёт показания между потребителем и энергокомпанией в реальном времени, обеспечивает системой мониторинга состояния оборудования для персонала электростанции.

Система прогнозной аналитики и умная сеть Smart Grid являются дополняющими друг друга программами. Первая предназначена для прогнозирования и планирования, а вторая – для управления в реальном времени.

Проведенное исследование позволило проследить тесную взаимосвязь между развитием энергетики Рязанской области и эволюцией требований к инженерному образованию. Исторический анализ показал, что каждый этап технологического развития энергосистемы – от первых частных электростанций конца XIX века до создания мощных генерирующих объектов советского периода и современных цифровизированных комплексов – формировал новые запросы к подготовке инженерных кадров.

Современное состояние энергетического комплекса региона характеризуется наличием диверсифицированных генерирующих мощностей. Стратегические перспективы развития отрасли связаны с цифровизацией, внедрением технологий Smart Grid, прогнозной аналитики и цифровых двойников, а также с развитием малой распределенной энергетики.

Эти тенденции обуславливают необходимость обновления инженерного образования. Современный специалист-энергетик должен обладать не только фундаментальными техническими знаниями, но и междисциплинарными компетенциями в области ИТ-технологий, экологического менеджмента, экономики и проектного управления.

Таким образом, успешное развитие энергетики Рязанской области в условиях цифровой трансформации напрямую зависит от качества подготовки инженерных кадров. Непрерывное обновление содержания инженерного образования является залогом технологического лидерства и энергетической безопасности Рязанской области в будущем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быстрицкий, Г. Ф. Общая энергетика: учебник для академического бакалавриата / Г. Ф. Быстрицкий. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2025. – 615 с.
2. Быстрицкий, Г. Ф. Техномеханическое оборудование электростанций: учебное пособие

для СПО / Г. Ф. Быстрицкий. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2025. – 278 с.

3. Фролов, Ю. М. Электроснабжение промышленных предприятий: учебное пособие / Ю. М. Фролов. – М.: КноРус, 2025. – 342 с.

4. Прядеин, В. С. История России в схемах, таблицах, терминах и тестах: учебное пособие / В. С. Прядеин. – М.: Проспект, 2025. – 204 с.

5. Цифровая трансформация энергетики: тенденции и вызовы / под ред. А. В. Иванова. – М.: Энергоатомиздат, 2024. – 312 с.

6. Развитие возобновляемой энергетики в России: региональный аспект / Сборник научных трудов. – СПб.: СПбГЭУ, 2024. – 156 с.

7. Smart Grid: технологии интеллектуальных сетей / Д. С. Петров, Е. А. Сидорова. – М.: Инфра-Инженерия, 2023. – 288 с.