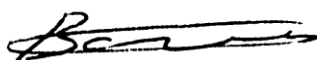


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

На правах рукописи

Вальнев Владислав Владимирович



АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ
ТЕХНИЧЕСКИМ ОБСЛУЖИВАНИЕМ И РЕМОНТОМ
ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ
НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Специальность 2.3.3. Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Котелева Н.И.

Санкт-Петербург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ В ОБЛАСТИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ ОБСЛУЖИВАНИЕМ И РЕМОНТОМ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	12
1.1 Современное состояние автоматизации промышленных предприятий.....	12
1.2 Автоматизированные системы управления техническим обслуживанием и ремонтom промышленного оборудования	18
1.3 Эволюция стратегий технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования	22
1.4 Системы поддержки принятия решений при выполнении технического обслуживания и ремонта оборудования	27
1.5 Выводы по главе 1	29
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ	31
2.1 Обоснование выбора метода анализа видеопотока для идентификации действий человека при выполнении технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования	31
2.1.1 Традиционные методы анализа видеопотока.....	32
2.1.2 Методы машинного обучения для анализа видеопотока.....	34
2.1.3 Особенности анализа видеопотока, содержащего процессы технического обслуживания и ремонта	36
2.1.4 Анализ видеопотока в алгоритме идентификации производственных процессов технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования	37
2.1.5 Метрики качества классификации признаков в моделях машинного обучения	39

2.2 Обоснование набора признаков для обучения моделей классификации действий человека при выполнении технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования	41
2.2.1 Признаки расстояния	41
2.2.2 Признаки углов	42
2.2.3 Геометрические признаки	43
2.2.4 Выбор статистических параметров для описания временной области признаков	44
2.2.5 Выбор функции вейвлет-преобразования для описания частотно-временной области признаков	49
2.3 Выводы по главе 2	56
ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ АЛГОРИТМА ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ	58
3.1 Техническое обслуживание и ремонт центробежного насоса	58
3.2 Техническое обслуживание и ремонт распределительного электрического щита	68
3.3 Применение алгоритма идентификации производственных процессов на открытом наборе данных	73
3.4 Промышленное испытание алгоритма идентификации производственных процессов на производственной линии сборки устройств защиты от импульсных перенапряжений	77
3.5 Сравнение разработанного алгоритма с известными методами распознавания действий человека в видеопотоке	85
3.6 Выводы по главе 3	86
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ	87

4.1 Оценка показателей эффективности технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования	87
4.2 Оценка требований к вычислительным ресурсам аппаратного обеспечения...	92
4.3 Взаимодействие программно-аппаратного комплекса с уровнями АСУ ТП и АСУП для информационного сопровождения жизненного цикла промышленного оборудования	96
4.4 Выводы по главе 4.....	100
ГЛАВА 5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА.....	102
5.1 Обоснование экономического эффекта	102
5.2 Оценка показателей экономической эффективности	107
5.3 Выводы по главе 5.....	110
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	112
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	114
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	116
ПРИЛОЖЕНИЕ А Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ	142
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт о внедрении результатов диссертационного исследования в АО «Хакель»	143
ПРИЛОЖЕНИЕ В Акт о внедрении результатов диссертационного исследования в АО «СоюзЦМА»	145

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Устойчивая и надежная эксплуатация технологических и производственных процессов является важной задачей для предприятий топливно-энергетического и минерально-сырьевого комплексов. Однако сегодня они сталкиваются с высоким уровнем износа технологической инфраструктуры, который в среднем по отраслям промышленности превышает 50 %, что приводит к длительным простоям оборудования, внеплановым ремонтам и, соответственно, значительным убыткам. Поэтому процесс технического обслуживания и ремонта (ТОиР) промышленного оборудования является особенно важным, от сроков и качества выполнения которого во многом зависит эффективность работы промышленных предприятий. Для автоматизации процесса управления ТОиР промышленного оборудования известны автоматизированные системы управления ТОиР (АСУ ТОиР), которые выполняют широкий спектр функций: планирование ТОиР, диагностику и контроль технического состояния оборудования, управление материально-техническими активами, учет затрат на выполнение ТОиР.

Однако непосредственно контроль процесса ТОиР в ремонтной зоне в подобных системах управления не рассматривается. Таким образом, информация о выполненных действиях по ТОиР поступает в информационные системы предприятия только на основе внесенных вручную актов и отчетов, заполнение которых без участия человека невозможно. Следовательно, дальнейшее повышение эффективности производственных процессов в управлении ТОиР требует поиска новых способов и алгоритмов, обеспечивающих автоматический контроль выполненных действий по ТОиР промышленного оборудования. Поэтому разработка новых средств автоматизации для процессов ТОиР представляет собой актуальную научную задачу, решение которой позволит снизить влияние человеческого фактора при учете выполненных производственных работ и обеспечить автоматический контроль технологии и времени работы, а интегрирование в структуру АСУ ТП и АСУП может создать

решение для информационного сопровождения жизненного цикла промышленного оборудования.

Степень разработанности темы исследования

Значительный вклад в решение проблем управления ТОиР внесли многие ученые, среди которых Абрамович Б.Н., Козярук А.Е., Назарычев А.Н., Воропай Н.И., Ковалёв Г.Ф., Волошин А.А., Жуковский Ю.Л.

Вопросы автоматизации и повышения эффективности производственных процессов на отечественных предприятиях рассмотрены в работах Белоглазова И.Н., Педро А.А., Харазова В.Г., Мышляева Л.П., Бажина В.Ю., Минцаева М.Ш. и других ученых.

Исследование методов машинного обучения, компьютерного зрения и на их основе решение задачи идентификации процессов в широкой степени освещены в работах Афанасьева В.О., Осипова Г.С., Бухановского А.В., Кульчицкого А.А., Годяева А.И., Rotman D., Mohd Noor H., C. Arora, Glowacz A.

Однако в настоящее время недостаточно исследований, которые бы решали актуальные задачи идентификации производственных процессов для управления техническим обслуживанием и ремонтом промышленного оборудования.

Объект исследования – процесс технического обслуживания ремонта промышленного оборудования.

Предмет исследования – методы идентификации производственных процессов технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования.

Цель работы – повышение эффективности управления производственными процессами за счет автоматического контроля выполнения ТОиР промышленного оборудования.

Идея работы. Для достижения поставленной цели необходимо разработать программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий идентификацию производственных процессов ТОиР промышленного оборудования, для которой необходимо осуществлять контроль действий человека на основе анализа набора признаков, полученных за счет обработки видеопотока, содержащего движение его рук.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Провести анализ научно-технических проблем в области управления техническим обслуживанием и ремонтом промышленного оборудования.
2. Изучить существующие методы идентификации действий человека при выполнении ТОиР промышленного оборудования.
3. Разработать и экспериментально обосновать алгоритм идентификации производственных процессов ТОиР промышленного оборудования.
4. Разработать программно-аппаратный комплекс для интегрирования в структуру АСУ ТОиР промышленного оборудования.
5. Оценить технико-экономические показатели эффективности применения программно-аппаратного комплекса в структуре АСУ ТОиР промышленного оборудования.

Научная новизна:

1. Предложен алгоритм идентификации производственных процессов ТОиР промышленного оборудования, включающий в себя набор признаков, который позволяет классифицировать действия человека на основе анализа видеопотока, содержащего движение его рук.
2. Введены три группы признаков, позволяющие описать перемещение рук в видеопотоке, и установлена зависимость временной и частотно-временной области признаков от выполняемого человеком действия во время ТОиР.
3. Предложена архитектура АСУ ТОиР промышленного оборудования для автоматического контроля действий по ТОиР, выполняемых для устранения дефектов, возникающих во время эксплуатации оборудования.

Соответствие паспорту специальности:

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами по пунктам:

п.8 Научные основы, модели и методы идентификации производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления и их цифровых двойников.

п.11 Методы создания, эффективной организации и ведения специализированного информационного и программного обеспечения АСУТП, АСУП, АСТПП и др., включая базы данных и методы их оптимизации, промышленный интернет вещей, облачные сервисы, удаленную диагностику и мониторинг технологического оборудования, информационное сопровождение жизненного цикла изделия.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработан алгоритм идентификации процессов технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования, позволяющий распознавать действия человека во время выполнения производственных процессов (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023680169) (приложение А).

2. Предложен способ повышения эффективности управления производственным процессом за счет своевременного выявления брака во время выполнения ТОиР промышленного оборудования на основе идентификации действий сотрудника.

3. Обоснованы требования к вычислительным ресурсам программно-аппаратного комплекса для реализации модели машинного обучения на основе предложенного алгоритма, связанные с необходимостью использования многопоточных вычислений на видеокарте для идентификации действий человека в режиме реального времени.

4. Предложено решение по интеграции программно-аппаратного комплекса на основе алгоритма идентификации производственных процессов ТОиР в структуру АСУ ТП и АСУП для информационного сопровождения жизненного цикла промышленного оборудования.

5. Результаты диссертационного исследования реализованы в виде программно-аппаратного комплекса и используются в производственном процессе,

что подтверждается актами о внедрении в АО «Хакель» (акт внедрения от 03.12.2024) (приложение Б) и АО «СоюзЦМА» (акт внедрения от 20.03.2024) (приложение В).

Методология и методы исследования.

Результаты диссертационной работы получены с использованием алгоритмов компьютерного зрения, методов построения моделей машинного обучения и теории анализа временных рядов. Разработка программно-аппаратного комплекса выполнена на языке программирования Python, сбор и хранение данных реализовано в базе данных PostgreSQL.

Положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм обработки видеопотока, основанный на контроле перемещения рук человека, позволяет идентифицировать производственные процессы технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования с точностью не менее 86 %.

2. Внедрение программно-аппаратного комплекса на основе алгоритма идентификации производственных процессов в структуру АСУ ТОиР позволяет автоматизировать контроль процессов ТОиР и сократить сроки выявления брака.

Степень достоверности результатов исследования основана на применении известных и общепризнанных теорий и методов обработки изображений и анализа временных рядов и подтверждена результатами экспериментальных исследований на лабораторных стендах образовательного центра цифровых технологий Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и промышленными испытаниями на производственной линии сборки устройств защиты от импульсных перенапряжений АО «Хакель». Работа выполнялась в рамках НИР «Цифровой тренажер промышленных процессов в рамках концепции Индустрия 4.0» ПАО «НК «Роснефть» по договору № НИ-35-808-21 от 23.04.2021.

Апробация результатов. Основные положения и результаты диссертационной работы представлены на всероссийских и международных конференциях. За последние 3 года принято участие в 12 научно-практических

мероприятиях с докладами, в том числе на 9 международных: Международный (май 2022 года) и всероссийский (декабрь 2024 года) форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург); 76-я Международная молодежная научная конференция «Нефть и Газ – 2022» (апрель 2022 года, г. Москва); Международный семинар «Новые средства и системы автоматизации в горно-обогатительном производстве, металлургии и экологии» (октябрь 2022 года, октябрь 2024 года, г. Москва); XXXI Международный научный симпозиум «Неделя горняка – 2023» (февраль 2023 года, г. Москва); 16-ая Международная школа молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых.» (октябрь 2023 года, г. Москва); 66-я Всероссийская научная конференция МФТИ (апрель 2024 года, г. Москва); XIII Конгресс молодых ученых ИТМО (апрель 2024 года, г. Санкт-Петербург); Международная научно-техническая конференция «Автоматизация, энергетика и машиностроение: технологии и инновации» (май 2024 года, г. Грозный); Международная конференция «Трудноизвлекаемые запасы нефти» (сентябрь 2024 года, г. Альметьевск); Международная научно-практическая конференция «Транспорт. Взгляд в будущее» (ноябрь 2024 года, г. Санкт-Петербург).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования, формулировке научных положений, проведении анализа отечественной и зарубежной научной литературы, разработке алгоритма идентификации производственных процессов ТОиР промышленного оборудования, проведении лабораторных и промышленных экспериментов. На основе алгоритма идентификации производственных процессов ТОиР промышленного оборудования автором разработано программное обеспечение для автоматического контроля действий ТОиР промышленного оборудования, выполнена оценка требований к вычислительным ресурсам аппаратного обеспечения, проведены расчеты экономической эффективности применения разработанного программно-аппаратного комплекса.

Публикации. Результаты диссертационного исследования освещены в 14 печатных работах (пункты списка литературы № 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 47, 128, 129, 130, 131, 132, 133), в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 4 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (приложение А).

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, пяти глав с выводами по каждой из них, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 185 наименований, и 3 приложений. Диссертация изложена на 146 страницах машинописного текста, содержит 72 рисунка и 23 таблицы.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю доценту кафедры автоматизации технологических процессов и производств Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II Котелевой Наталье Ивановне за поддержку и помощь в проведении научных исследований и формировании главной идеи диссертационной работы, коллективу образовательного центра цифровых технологий и выпускающей кафедре автоматизации технологических процессов и производств Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II за всестороннюю поддержку при подготовке диссертации.

ГЛАВА 1 НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ В ОБЛАСТИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ ОБСЛУЖИВАНИЕМ И РЕМОНТОМ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

1.1 Современное состояние автоматизации промышленных предприятий

Сегодня предприятия топливно-энергетического и минерально-сырьевого комплексов (ТЭК и МСК) формируют более 20 % ВВП [59]. В связи с этим обеспечение благоприятных условий для функционирования производственных и бизнес-процессов – заметный фактор социально-экономического развития страны. Согласно стратегии научно-технологического развития Российской Федерации [69], существует необходимость в создании наукоемких технологий и систем для организации производственных процессов. Ключевые направления Российской Федерации в области поддержки промышленных предприятий топливно-энергетического комплекса представлены на рисунке 1.1 [41].

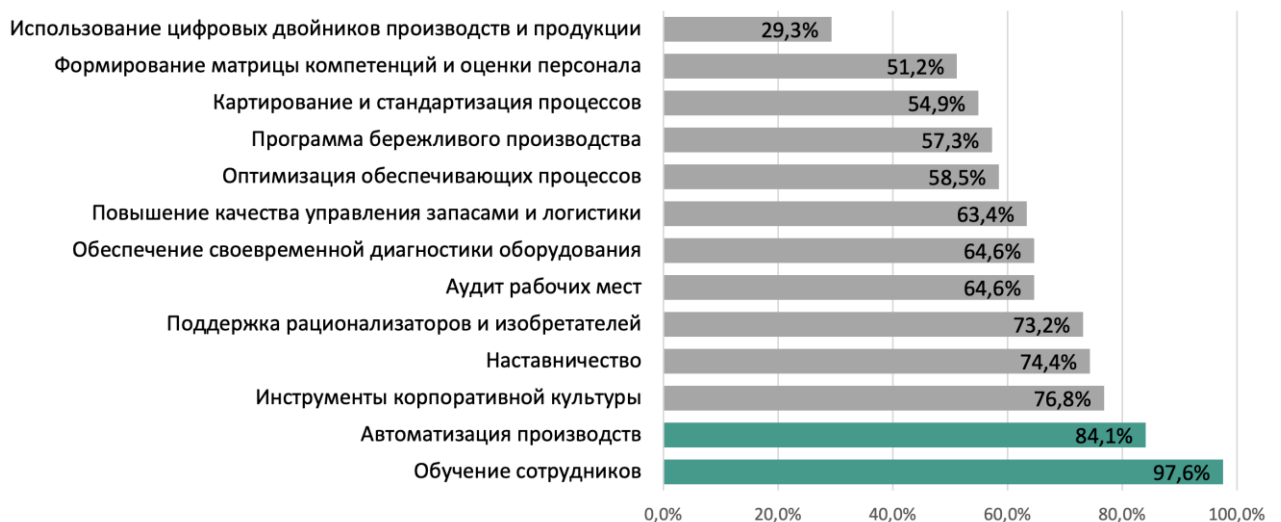


Рисунок 1.1 – Направления для повышения производительности труда в компаниях [41]

Среди перечисленных направлений, большинство предприятий заинтересовано в повышении квалификации сотрудников и автоматизации производства. При этом среди ключевых направлений можно выделить шесть, которые характеризуют необходимость в развитии технологической инфраструктуры предприятий, а именно: «Использование цифровых двойников производств и продукции», «Программа бережливого производства»,

«Оптимизация обеспечивающих процессов», «Повышение качества управления запасами и логистики», «Обеспечение своевременной диагностики оборудования», «Автоматизация производств».

Большинство процессов в современном мире стремится к автоматизации. Потребность промышленных предприятий в повышении уровня автоматизации производства заметна по темпам роста рынка АСУ ТП в России. На рисунке 1.2 представлен график объемов и темпов роста рынка АСУ ТП в России за период 2015-2022 годов.

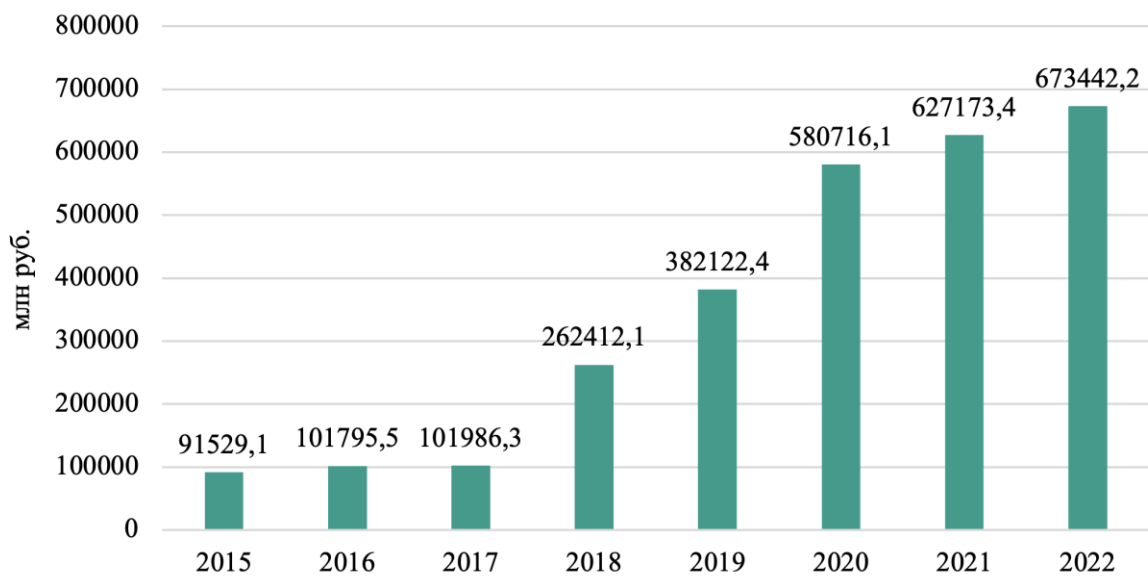


Рисунок 1.2 – Объем и темп прироста рынка АСУ ТП в России в 2015-2022 гг. в стоимостном выражении [65]

За представленный промежуток времени объем рынка АСУ ТП увеличился в 7,4 раза. Причем ТЭК и МСК являются крупнейшими потребителями АСУ ТП (рисунок 1.3).

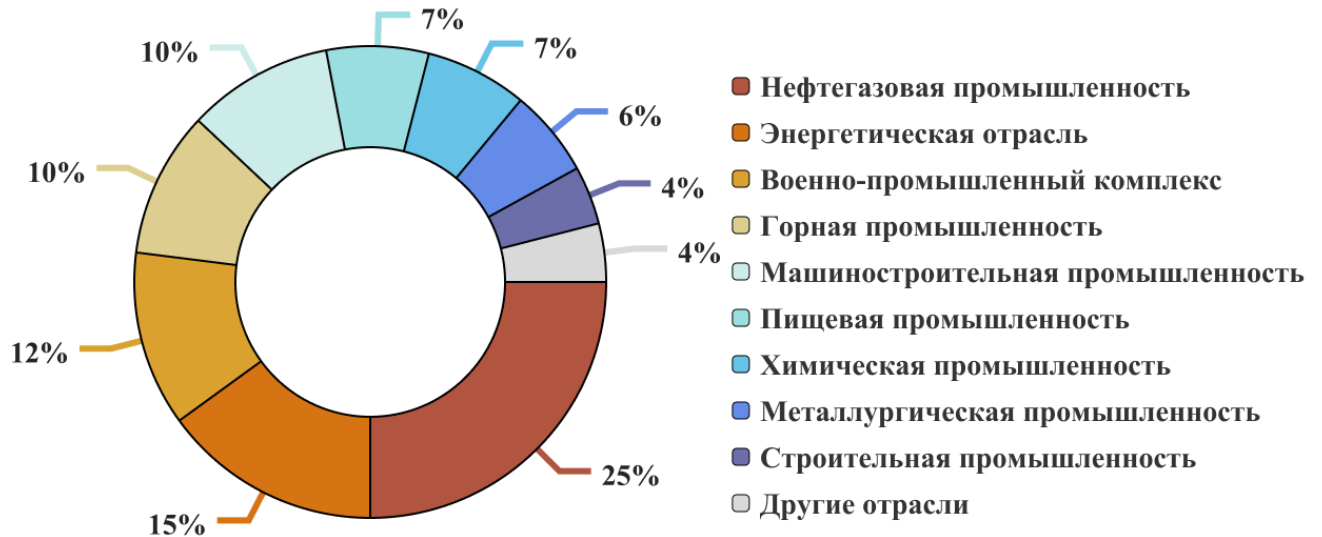


Рисунок 1.3 – Наиболее крупные потребители АСУ ТП [65]

Поэтому бесперебойная и надежная эксплуатация технологического оборудования на предприятиях ТЭК и МСК является одной из важнейших задач для поддержания достойного энергообеспечения необходимыми ресурсами, устойчивого развития экономики, повышения уровня промышленной безопасности, что напрямую влияет на конкурентоспособность государства в условиях глобальных энергетических вызовов [2, 7, 36]. Ключевым процессом, позволяющим продлить срок службы оборудования и обеспечить надежность эксплуатации технологических процессов является техническое обслуживание и ремонт [70].

По данным Росстата [58], износ технологического оборудования на предприятиях ТЭК и МСК превышает 50 %, а в некоторых регионах износ оборудования может достигать 70 % [34, 62]. На рисунке 1.4 показана диаграмма, отражающая среднее значение износа технологического оборудования в разных отраслях промышленности. Существенный износ технологической инфраструктуры приводит к длительным простоям оборудования, внеплановым ремонтам и, соответственно, значительным убыткам. Поэтому процесс технического обслуживания и ремонта оборудования является особенно важным, от сроков и качества выполнения которого во многом зависит эффективность

работы промышленных предприятий. Вопрос износа и остаточного ресурса актуален не только для технологического оборудования, но и для оборудования АСУ ТП, эксплуатационный период которого непременно должен обеспечивать безотказность и непрерывную эксплуатацию технологического процесса [9, 12, 60, 71]. Например, согласно статистике, приведенной в [142], на уровне АСУ ТП частой проблемой является выход из строя датчиков (35%) и исполнительных механизмов (50%), реже – ПЛК (15%).

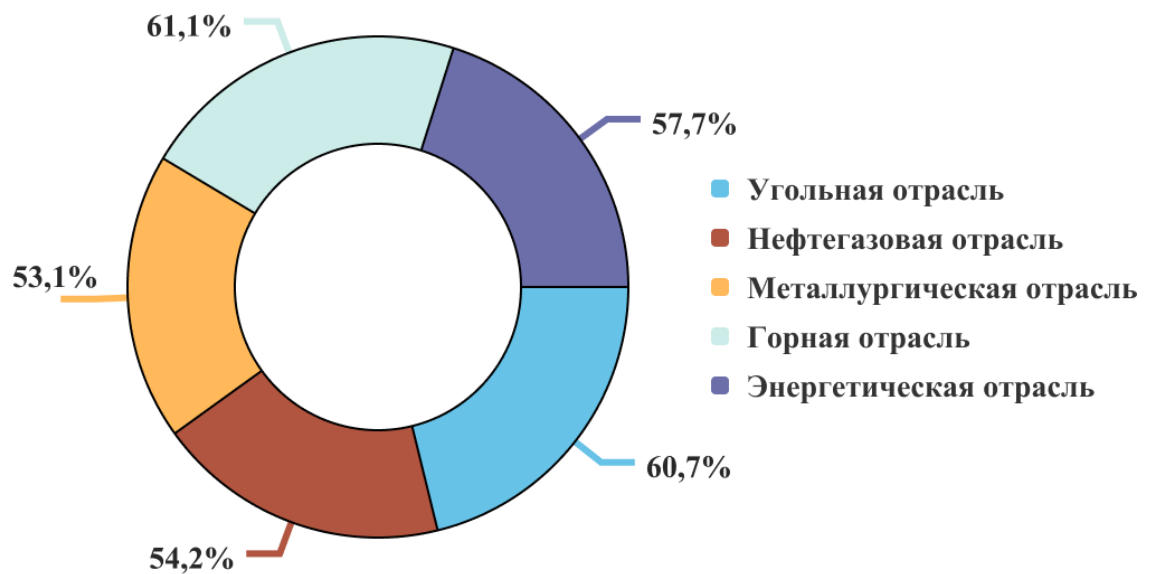


Рисунок 1.4 – Износ технологического оборудования на промышленных предприятиях (по отраслям) [58]

В тоже время российская промышленность столкнулась с сильной вендорной зависимостью компонентов и программного обеспечения в автоматизированных системах управления. Согласно публичным докладам представителей крупных промышленных предприятий, уровень вендорной зависимости достигает 90 % [38]. Таким образом, предприятия ТЭК и МСК оказались в положении, когда выход из строя одного компонента системы невозможно заменить другим производителем. А прекращение поставок любого элемента системы вынуждает менять целые узлы компонентов. На рисунке 1.5 показаны элементы в классической архитектуре систем автоматизации, которые имеют высокую вендорную зависимость [10].

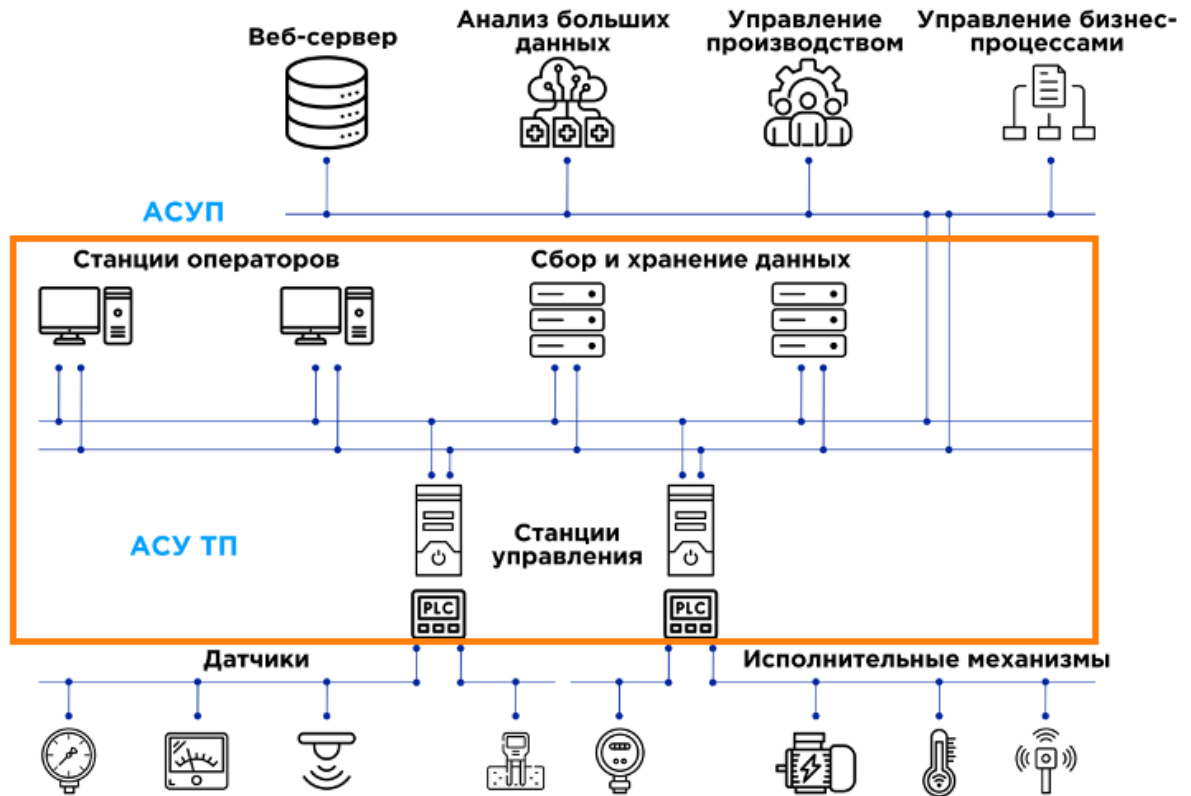


Рисунок 1.5 – Вендорная связанность компонентов в классической архитектуре АСУ ТП (составлено автором на основе [38])

В ответ на данную проблему родилась потребность промышленности в разработке архитектуры, направленной на взаимозаменяемость компонентов и программного обеспечения, но в тоже время отвечающих требованиям безопасности производственных процессов.

Рассматривая решения в области открытых архитектур АСУ ТП, известна архитектура Namur [147], которая предполагает стандартизацию и унификацию интерфейсов и протоколов для обеспечения совместимости и взаимодействия между различными компонентами автоматизированных систем управления. Она также акцентирует внимание на модульности и масштабируемости систем, что позволяет легко адаптировать и расширять их под специфические требования конкретных производств. Известен также стандарт открытой архитектуры OPAS (Open Process Automation) [92], который предлагает объединять устройства различных производителей, с помощью добавления специальных программных узлов, обеспечивающих преобразование информации в необходимый унифицированный формат, подключаемый к общей информационной шине

данных, обеспечивающей передачу информации на другие уровни автоматизации. Автоматизированные системы управления на основе протоколов интернета вещей – еще один способ обеспечить модульность архитектуры. В работах [166, 171] рассматривают интеграцию облачно-сетевых архитектур для расширения возможностей в системах управления, делая их более совместимыми с другими подсистемами производства. Рассматривая протоколы передачи данных, в открытой архитектуре принято называть протокол OPC UA. В работе [121] рассматривают возможность использования протокола OPC UA для синхронной передачи изображений. Одновременно с активным развитием направления индустриального компьютерного зрения исследования многих ученых показывают перспективное взаимодействие описанных направлений. В [94, 98] рассматривают подходы к управлению производственными процессами, предлагая интеграцию производственных систем управления через общую производственную шину на основе OPC UA протокола. Также известны промышленные информационные системы, передача данных в которых осуществляется через протокол MQTT. Например, в работе [127] реализована архитектура информационной системы передачи данных от паровых машин и их цифровой модели в облачный сервис для мониторинга работы оборудования.

Помимо автоматизации технологических процессов на производстве, похожие проблемы информационного обмена и вендорной зависимости присутствуют и на уровнях систем энергоснабжения предприятий. Причем существует достаточное количество исследований, доказывающих эффективность использования энергетических параметров технологического оборудования в системах АСУ ТП для управления технологией производства, в том числе используя технологию цифровых двойников [16, 25, 52, 57, 125].

При этом автоматизация управления энергосистемой предприятия использует ряд технологий, например, smartgrid на основе протокола goose [80, 151] и другие, что также затрудняет модульность решений и взаимозаменяемость различных производителей в системах энергоснабжения. Существует достаточно много исследований, где ученые предлагают различные сервисы для повышения

эффективности на производстве. Среди таких [6, 39, 75], однако представленные решения выполнены на основе коммерческих лицензионных иностранных продуктов. Таким образом, концепция открытой архитектуры построения систем автоматизации в виде программных сервисов должна опираться на общедоступные и общепризнанные решения, отвечающие необходимым производственным требованиям и стандартам.

1.2 Автоматизированные системы управления техническим обслуживанием и ремонтом промышленного оборудования

Для автоматизации и управления процессами ТОиР применяют различные информационные системы, структурно представляющие MES и ERP уровень предприятия. Эти системы обеспечивают вертикальную интеграцию данных – от оперативного до стратегического уровня. Основное назначение подобных систем – планирование и управление ресурсами, необходимые для проведения ТОиР, учет затрат на ТОиР, контроль технического состояния оборудования. В качестве контролируемых ресурсов могут быть как складские запасы и комплектующие, так и электронные документы, и паспорта оборудования. Разработка и внедрение автоматизированных систем управления ТОиР (АСУ ТОиР) для промышленного сектора ведется многими компаниями-интеграторами. На рисунке 1.6 представлено распределение количества проектов АСУ ТОиР, реализованные основными компаниями-разработчиками по отраслям промышленности [107].

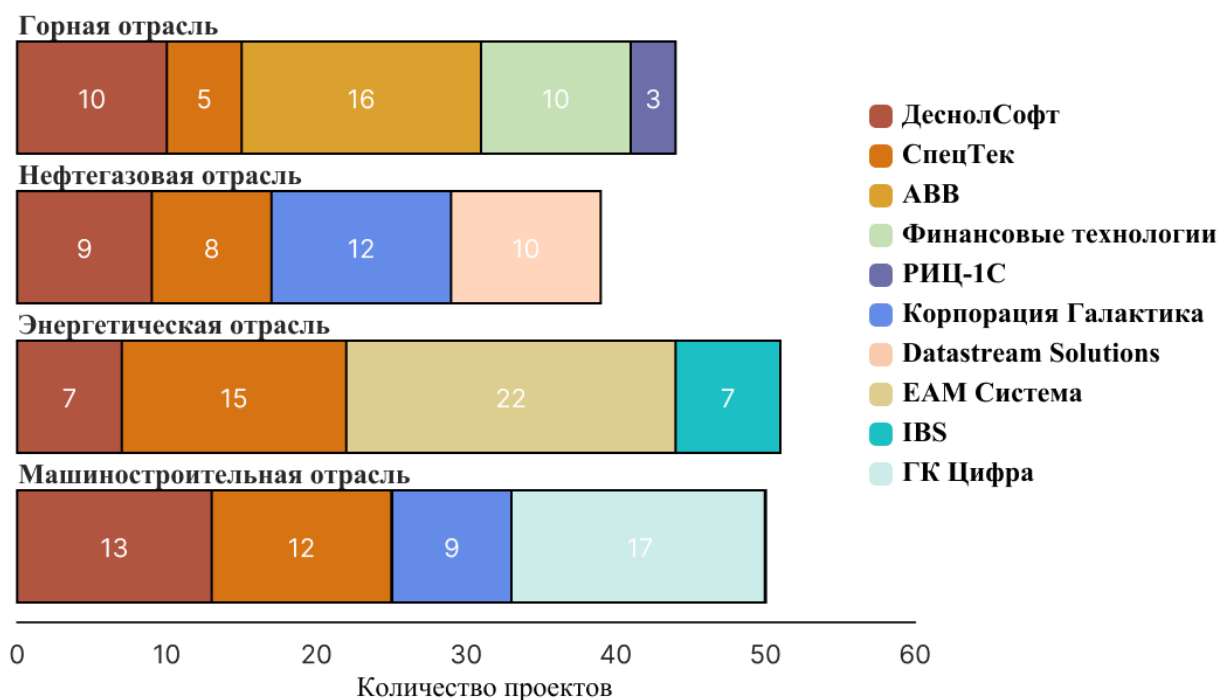


Рисунок 1.6 – Распределение проектов по внедрению АСУ ТОиР на
промышленные предприятия [107]

Широкое разнообразие решений, с одной стороны, покрывает растущий спрос, но с другой – говорит об использовании решений с закрытой архитектурой, что осложняет замену и расширение функционала систем управления на фоне модернизации и обновления технологического оборудования. Кроме того, среди АСУ ТОиР известны как отечественные, так и зарубежные производители. Однако можно выделить наиболее известные отечественные решения, которые присутствуют на рынке более 20 лет (таблица 1.1) [6, 33, 37].

Таблица 1.1 – Системы управления техническим обслуживанием и ремонтом (составлено автором)

Система управления (Производитель)	Пользователь	Отрасль ТЭК
1С: ТОиР (Деснол Софт)	ПАО «Татнефть»	нефтегазовая
	АО «Минудобрения»	химическая
	ООО «Сахалинская энергия»	нефтегазовая
	ООО «Газпромнефть-Снабжение»	нефтегазовая
	АО «Алматинские электрические станции»	энергетика
	ООО «Хевел»	энергетика
	АО «Сибирская Сервисная компания»	нефтегазовая
	ООО «ЭнергоТехСервис»	энергетика
	АО «Уралкабель»	энергетика

Продолжение таблицы 1.1

Парус (Корпорация Парус)	АО «Сибирская Угольная Энергетическая Компания»	угольная
	АО «Татэнерго»	энергетика
	ПАО «НГК «Славнефть»	нефтегазовая
Global EAM (Бизнес Технологии)	ООО «НИКОХИМ»	химическая
	ГУП «Литейно-прокатный завод»	металлургическая
	АО «ГК «Электроцит»-ТМ Самара»	энергетика
	ООО «Чакан ГЭС»	энергетика
TRIM (СпецТек)	ООО «Южно-Кузбасская энергетическая компания»	энергетика
	АО «Ярославская электросетевая компания»	энергетика
	ООО «Амурский гидрометаллургический комбинат»	металлургическая
	ООО «Богуславец»	горная
	ОАО «Евразруда»	горная
Галактика ЕАМ (Корпорация «Галактика»)	ПАО «Транснефть»	нефтегазовая
	ООО «Газпром добыча Оренбург»	нефтегазовая
	АО «Ангарская нефтехимическая компания»	нефтегазовая
	АО «Концерн Росэнергоатом»	энергетика
	ОАО «Северо-Кузбасская энергетическая компания»	энергетика

Длительное сотрудничество представленных компаний-разработчиков АСУ ТООР с крупными промышленными предприятиями позволило развиваться параллельно с эволюцией подходов и стратегией выполнения ТООР. В основном благодаря такому продолжительному использованию на предприятии решений одного вендора, новые решения в АСУ ТООР сталкиваются с проблемами при внедрении, поскольку они должны отвечать требованиям уже имеющегося функционала в АСУ ТООР. Таким образом, архитектура предлагаемых решений должна учитывать модульность и взаимозаменяемость элементов в своей структуре, что позволит построить автоматизированные системы предприятия с открытой архитектурой. Такой подход упростит поддержание работы уже имеющихся элементов в структуре систем управления, а также масштабирование и применение новых модулей и функций.

Функционально системы управления ТООР имеют различия. Первые системы управления ТООР появились в 60-х годах и назывались CMMS (Computerized Maintenance Management System). CMMS не затрагивают сам процесс выполнения технического обслуживания и ремонта. Они предназначены для контроля и управления ресурсами ТООР. Согласно исследованию [175], количество успешных реализаций CMMS составляет около 25-40 %. Главной

целью таких систем управления является не поддержка принятия решений при ТОиР, а менеджмент процесса ремонта. Чуть позже появились более крупные по функционалу системы, называемые EAM (Enterprise Asset Management) системы. Ключевые различия между CMMS и EAM заключаются в области охвата процессов ТОиР. CMMS предназначены для управления одной промышленной площадкой или предлагают поддержку ограниченного их количества, в то время как EAM системы располагают функционалом для управления множеством промышленных площадок и предприятий, а также могут затрагивать бизнес-процессы предприятия [85]. В таблице 1.2 сосредоточено краткое сравнение описанных видов систем управления ТОиР.

Таблица 1.2 – Сравнение функциональных возможностей систем управления ТОиР (составлено автором)

Система управления ТОиР	Краткое описание	Достоинства	Недостатки
CMMS	– CMMS используются для планирования и отслеживания ремонтных работ, учета запасов и материалов, контроля над сроками службы оборудования, анализа данных по обслуживанию и создания отчетов	– Упрощение планирования ремонтных работ и предотвращение нештатных ситуаций. – Оптимизация запасов и материалов, что позволяет сократить издержки. – Улучшение прозрачности и отчетности в процессах обслуживания.	– Необходимость в постоянном обновлении и адаптации к изменяющимся условиям.
EAM	– Системы управления активами предприятия, которые охватывают более широкий спектр функций, чем CMMS. Они включают в себя управление жизненным циклом активов, оптимизацию расходов на обслуживание и анализ данных для принятия стратегических решений.	– Интеграция с бизнес-процессами и другими системами предприятия. – Управление жизненным циклом оборудования: от закупки до утилизации. – Аналитика и прогнозирование, способствующие оптимизации стратегий обслуживания.	– Высокая стоимость внедрения и поддержки. – Сложность интеграции с существующими системами, особенно на крупных предприятиях.

Таким образом, разработка и внедрения АСУ ТОиР на промышленные предприятия, а также ее масштабирование целесообразно при выборе открытой

архитектуры с учетом требований безопасности [53]. Повышение эффективности в управлении ТОиР за счет применения АСУ ТОиР возможно на основе новых функциональных возможностей, позволяющих на уровне организации и планирования бизнес-процессов предприятия получать дополнительную необходимую информацию в автоматическом режиме. Таковой информацией может служить результат выполнения ремонтных работ обслуживающим персоналом, то есть оценка производительности и качества выполненных работ, вносимая в систему управления автоматически. При этом на различных промышленных предприятиях могут применяться разные стратегии выполнения ТОиР, поэтому решение по оценке ремонтных работ должно быть модульным в плане архитектуры, а также масштабируемым для различного технологического оборудования, обладающего своей спецификой как при эксплуатации, так и при техническом обслуживании и ремонте.

1.3 Эволюция стратегий технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования

Эволюция стратегий ТОиР тесно связана с этапами промышленной революции, однако движущие силы этого процесса носят комплексный характер. Промышленность не стояла на месте и постепенно претерпевала изменения в сторону повышения эффективности и модернизации производства [84, 154]. Соответственно, стратегии проведения ремонтных работ также претерпевали изменения. На основе [35, 143] была составлена эволюция стратегий и систем управления ТОиР (рисунок 1.7).

Классификационный признак	I Промышленная революция	II Промышленная революция	III Промышленная революция	IV Промышленная революция
	XVI-XIX вв.	1870-1960	1960-2016	2016-н.в.
Описание этапа развития	Механизация производства Использование энергии воды и ветра Использование бумажных носителей, рукописные записи информации	Массовое производство Электрификация производства	Автоматизация производства Развитие Web-сервисов, IT-систем Разработка и внедрение PLC и электроники в промышленности	Цифровизация, роботизация производства Смещение в сторону "интеллектуального производства" Обеспечение гибкости управления Внедрение кибер-физических систем, "сквозных" цифровых технологий
Преобладающая система ТОиР	Отсутствует	Планово-предупредительный ремонт Профилактическое обслуживание	Планово-предупредительный ремонт Появление CMMS, EAM, TPM, RCM систем управления	Проведение ремонта по текущему состоянию Развитие предиктивного обслуживания
Подход в организации деятельности ремонта	Функциональный	Функциональный Системный	Функциональный Системный Ситуационный	Функциональный Системный Ситуационный Предиктивный
Способ проведения ремонта	По факту отказа оборудования	Планово-профилактический ремонт	По текущему состоянию оборудования	По текущему состоянию оборудования с учетом рисков и прогноза остаточного ресурса оборудования

Рисунок 1.7 – Эволюция стратегий и систем управления техническим обслуживанием и ремонтом [35]

По рисунку сделан вывод о том, что переход от планово-предупредительных ремонтов (ППР) к обслуживанию по фактическому состоянию объясняется не только износом активов, но и возможностью непрерывного мониторинга параметров оборудования через датчики, что снижает риск незапланированных простоев [42, 185]. Исторический анализ показывает, что каждая промышленная революция вносила коррективы в стратегии ТОиР. Каждый этап напрямую связан с используемыми энергетическими ресурсами, преобладающими в определенный период времени [4, 119]. До XIX века первую промышленную революцию характеризует источники энергии, основанные на преобразовании энергии воды и ветра, бумажные носители информации, а ТОиР оборудования проводился только по факту отказа, поскольку промышленность только вступила на ступень механизации производства. С появлением электрификации производства промышленность перестраивается, наращивая мощности и увеличивая объемы производства. Такими темпами производство становится массовым, что требует систематического подхода к обслуживанию [1, 5, 11]. В это время создают планы и

графики профилактического технического обслуживания (ППР), главной целью которых является поддержание работоспособности большого количества оборудования. При этом информация о состоянии оборудования появляется только через определенные интервалы времени – во время планового, текущего или капитального ТОиР. Межремонтный период в это время полностью изолирует оборудование от персонала, и каждый последующий ремонт продлевает срок службы оборудования на неопределенное время [54]. С изобретением программируемого логического контроллера (ПЛК) наступает автоматизация производства и постепенно начинают появляться системы управления ТОиР. Систематический подход к проведению ремонта все же остается. Также используется профилактическое обслуживание, но внедрение систем управления ТОиР позволяет контролировать складские запасы, готовность парка оборудования, загруженность человеческих ресурсов [77]. Благодаря средствам измерения, датчикам, сенсорам и информационным сетям появляется постоянный мониторинг показателей работы оборудования [112]. Это позволяет точнее устанавливать неисправности оборудования и причины возникновения. В настоящее время промышленность стремится к интеллектуализации производства, оснащением киберфизическими системами, которые объединят различные структуры и подсистемы производства в единую функционирующую платформу, которая позволит обрабатывать все сферы деятельности компании и осуществлять более гибкое управление ресурсами, финансами, производством и персоналом [49, 51, 77]. Четвертая промышленная революция трансформирует проведение ТОиР в соответствии с фактическим состоянием оборудования. При исправной работе оборудования нет необходимости проводить ТОиР, несмотря на составленный график профилактического обслуживания или требования ППР. В этой концепции график технического обслуживания и ремонта является динамическим и индивидуальным для каждого вида оборудования или каждой единицы в частности. Описанный подход может сохранить запасные детали оборудования, оптимизировать складские запасы, снизить нагрузку на обслуживающий персонал и распределить во времени ремонтные работы парка оборудования [32, 184].

Благодаря наличию большого количества информации об оборудовании появилась стратегия RCM (Reliability Centered Maintenance), которая отличается от традиционных планово-предупредительных ремонтов. Техническое обслуживание, ориентированное на надежность оборудования обеспечивает минимизацию рисков возникновения нештатных ситуаций при максимально возможной эксплуатационной готовности основных фондов с учетом бюджетных ограничений и различного рода рисков. Также известна стратегия комплексного технического обслуживания TPM (Total Productive Maintenance), в основе которой лежит идея внедрения технического обслуживания в повседневную деятельность сотрудников, уделяя особое внимание стратегиям предупредительного обслуживания и совершенствованию стратегии планово-предупредительного ремонта. Система TPM построена на систематическом устранении всех источников потерь и дефектов в технологическом оборудовании с целью минимизации простоев оборудования.

Функциональные возможности систем управления ТОиР направлены в сторону проактивного технического обслуживания, то есть обслуживания по фактическому состоянию оборудования (рисунок 1.8). Данный подход к техническому обслуживанию в настоящее время широко применяется на многих предприятиях, но при этом современная наука и технологии предоставили возможность предсказывать неисправности оборудования и срок выхода из строя [43, 61]. В этой связи интерес к предиктивной диагностике сильно возрос [24, 28, 45, 55, 56].

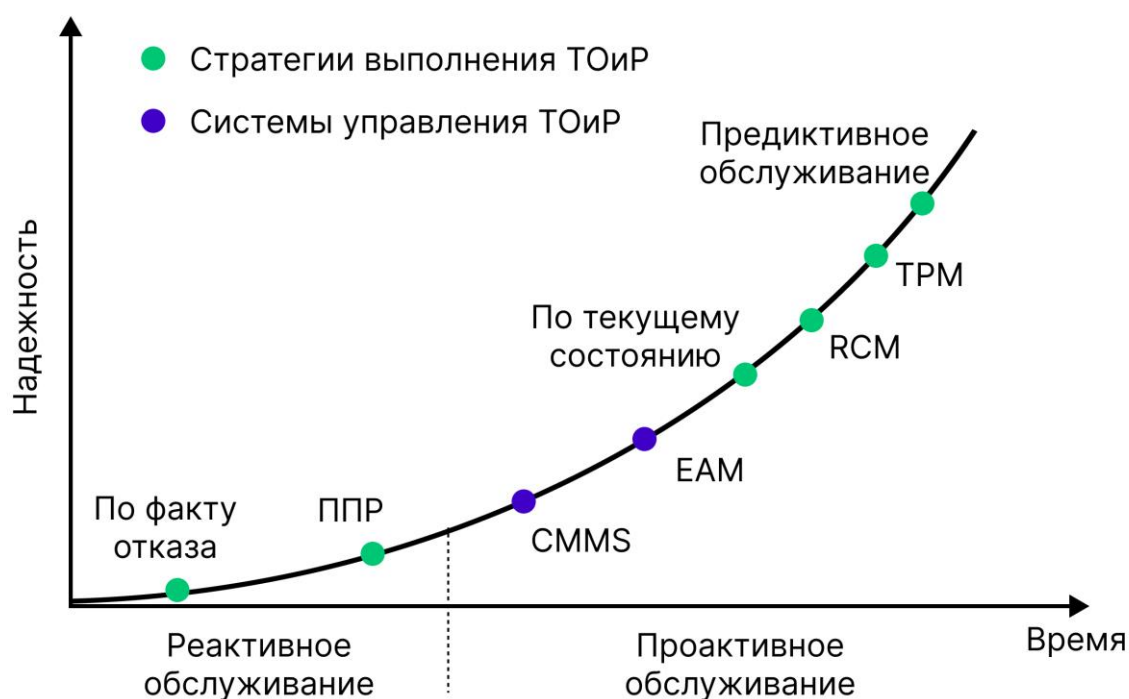


Рисунок 1.8 – Стратегии и системы управления ТОиР в зависимости от надежности эксплуатации оборудования и сроков выполнения ремонта [175]

Спрос на автоматизацию процессов ТОиР обосновывается также рядом проблем, которые на протяжении долгого времени обсуждаются в научной литературе [86, 106]. Наиболее часто встречающиеся проблемы в сфере технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Проблемы технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования (составлено автором)

Категория	Проблема
Доступность и наличие ресурсов	Нехватка квалифицированных специалистов для проведения ремонта и обслуживания
	Отсутствие необходимых деталей и комплектующих для замены
	Продолжительность ремонта и обслуживания
Технические проблемы	Несоответствие технических характеристик новых деталей и комплектующих старому оборудованию
	Спрос на совершенствование и расширение программного обеспечения применительно к техническому обслуживанию и ремонту
	Недостаточная эффективность и точность диагностики проблем оборудования
Условия проведения ремонта	Необходимость проведения ремонта в условиях повышенной опасности (высокое напряжение, высокая температура, химические вещества и др.)

Продолжение таблицы 1.3

Условия проведения ремонта	Необходимость адаптации к современным технологиям и системам
Организационные проблемы	Необходимость проведения ремонта в условиях ограниченного доступа к технической документации и инструкциям по эксплуатации оборудования, технических характеристиках оборудования
	Необходимость проведения ремонта в условиях ограниченного доступа к транспортным средствам для доставки необходимых материалов и оборудования
	Необходимость проведения ремонта в условиях ограниченного доступа к техническим службам и сервисным центрам

Продолжительное присутствие в производственном процессе описанных проблем объясняется отсутствием необходимых функциональных возможностей в АСУ ТООиР, что в совокупности снижает показатели эффективности ТООиР и предприятия в целом. Оценку эффективности работ по техническому обслуживанию и ремонту оборудования регламентирует ГОСТ Р 57330-2016 «Системы технического обслуживания и ремонта. Ключевые показатели эффективности» [31]. Для решения и снижения влияния описанных проблем в области управления ТООиР известны различные подходы и решения, которые в широкой степени зависят от стратегии выполнения ТООиР на предприятии. Одно из направлений, позволяющее нивелировать представленные проблемы при выполнении ТООиР, – использовать информационные системы поддержки принятия решений для оперативного персонала (СППР).

1.4 Системы поддержки принятия решений при выполнении технического обслуживания и ремонта оборудования

Выполнение ТООиР оперативным персоналом требует строгого соблюдения технологии обслуживающих и ремонтных работ, предусмотренных изготовителем оборудования и регламентированных соответствующими документами. Обычно мероприятия, требующие выполнения в той или иной работе по ТООиР, отражены в технологической карте ремонта оборудования. Контроль качества выполнения соответствующих работ выполняет отдел технического контроля, проверяя соответствие технологических параметров оборудования необходимому допустимому диапазону значений [13, 40, 48]. Существуют различные

информационные системы, упрощающие проведение ремонтных работ для оперативного персонала. Основной идеей таких систем является появление подсказок, уведомлений и подобных когнитивных сигналов для сотрудника, снижающих вероятность ошибок, нарушения технологии ремонта и обеспечивающих дополнительной информацией об оборудовании и о текущей выполняемой работе [27, 50, 99, 146]. Множество научной литературы, посвященной исследованию систем поддержки принятия решений в области управления ТОиР, выполнены с применением технологии дополненной реальности и компьютерного зрения [17, 19, 22, 23]. В таблице 1.4 представлен обзор научных статей с краткой характеристикой, предлагающие решения в области ТОиР на основе СППР и технологии дополненной реальности и компьютерного зрения.

Таблица 1.4 – Системы поддержки принятия решений на основе технологии дополненной реальности и компьютерного зрения для процессов ТОиР (составлено автором)

Область применения	Аппаратное обеспечение	Программное обеспечение	Отрасль ТЭК	Источник
ТОиР Диагностика	Hololens2	Unity3D, Matlab	металлургия	[132]
ТОиР	Мобильный телефон	Unity3D	электроэнергетика	[128]
ТОиР	Мобильный телефон	Unity3D	нефтегазовая	[129]
ТОиР	Hololens2	Unity3D, Aveva Dynsim	нефтегазовая	[131]
ТОиР Обучение	Мобильный телефон	Unity3D	электроэнергетика	[133]
ТОиР	Hololens2, Планшет	Unity3D	перерабатывающая	[172]
Обучение	Hololens2	Unity3D	-	[76]
ТОиР	Камера, роборука, VR очки	python, opencv	-	[115]
ТОиР Диагностика	-	ARCore, ARKit	-	[140]
ТОиР Диагностика	Очки RealWear	-	электроэнергетика	[163]
ТОиР	Hololens2	Unity3D	-	[139]
ТОиР Диагностика	Планшет	Unity3D, SolidWorks	электроэнергетика	[157]
Диагностика	Планшет	-	электроэнергетика	[159]
Диагностика	Hololens2, Arduino	Unity3D, JavaScript	-	[82]
Диагностика	Планшет	ARCore, ARKit	-	[120]
Обучение	Планшет	Unity3D	-	[111]
Обучение	Мобильный телефон	Unity3D	-	[158]
ТОиР	Планшет	-	-	[88]

Продолжение таблицы 1.4

ТОиР	Мобильный телефон, Hololens2	Unity3D	горная	[108]
ТОиР	Очки RealWear	-	горная	[181]
Диагностика	Hololens2	Unity3D	строительство	[170]
Диагностика	Планшет	-	строительство	[122]

Приведенные литературные источники подтверждают актуальность направления исследования и подчеркивают необходимость разработки технических и научных решений для повышения эффективности производственных процессов в области технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования. Также заметно ограниченное количество инструментов для разработки подобных систем, что требует дополнительных исследований для решение прикладных задач в этой области.

1.5 Выводы по главе 1

Высокая степень износа технологического оборудования на предприятиях ТЭК и МСК, в среднем превышающая 50 %, создает высокую значимость для процессов технического обслуживания и ремонта. Поэтому повышение эффективности управления ТОиР является актуальным направлением исследования.

Анализ проблем в области управления производственными процессами, в том числе ТОиР, показал, что промышленные предприятия сталкиваются с рядом ограничений, снижающих эффективность работы предприятия. Одной из ключевых трудностей остается низкий уровень квалификации сотрудников, отвечающих за выполнение ТОиР. Это приводит к ошибкам, задержкам в сроках выполнения производственных работ и росту затрат на ТОиР. Множество исследований и разработок СППР подтверждают необходимость в контроле процессов ТОиР, выполненных сервисными инженерами.

Необходимость ручного ввода большого количества данных о выполненных работах во время ТОиР в автоматизированные системы управления – еще один барьер, снижающий эффективность управления производственными процессами. Это увеличивает время принятия решений, снижает оперативность реагирования на неисправности оборудования и ошибки при ремонте. Кроме того,

существующие системы управления часто функционируют изолированно, что приводит к дублированию процессов и отсутствию единой аналитической платформы. Поскольку все эффекты, которые могло получить производство от классической архитектуры, уже получены [18], вопросы коммуникационного взаимодействия информационных систем предприятия является важным для изучения.

Преодоление описанных барьеров и решение проблем при управлении ТОиР возможно при поиске и внедрении новых средств и способов автоматизации производственных процессов, что представляется в следующих направлениях исследования:

1. Разработка эффективных методов обучения с применением цифровых технологий дополненной и виртуальной реальности.
2. Развитие систем поддержки принятия решений для оперативного персонала с учетом изменений в стратегиях выполнения ТОиР в сторону предсказательного обслуживания.
3. Разработка средств автоматизации для контроля процессов ТОиР с целью обеспечения прозрачности в выполнении ремонтных работ промышленного оборудования, автоматической оценке эффективности ТОиР, расширении функционала АСУ ТОиР и интегрирование новых решений в структуру АСУ ТОиР для снижения влияния человеческого фактора при заполнении отчетов и актов о выполненных производственных работах.

Таким образом, описанные проблемы управления ТОиР и предложенные направления для их решения доказывают актуальность цели исследования и поставленных задач.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

2.1 Обоснование выбора метода анализа видеопотока для идентификации действий человека при выполнении технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования

Поставленная задача идентификации действий обслуживающего персонала и оценка качества его работы затрагивает множество сложных вопросов, связанных с индивидуальными особенностями и поведением человека во время работы. В этой связи выполнение одних и тех же действий по ТОиР может отличаться в разные моменты времени даже при работе одного и того же сотрудника. Помимо индивидуальных факторов, на сотрудника влияет множество внешних факторов. Первым этапом для оценки выполненных работ по ТОиР станет определение действий, которые выполнил сотрудник во время работы.

Для этого существует достаточно много методов и исследований, посвященных описанной задаче. Глобально можно выделить два направления для идентификации действий человека: основанные на анализе показаний датчиков и основанные на анализе видеопотока [15, 167]. Например, в исследовании [102] используют акселерометр на руке человека, а в [124, 141] используются акселерометр и гироскоп, значения с которых обрабатываются и передаются на телефон, где отображается результат распознавания действий человека. Достоинством таких методов распознавания является использование простых и недорогих датчиков, но с точки зрения удобства использования в процессе работы и передвижений они могут доставлять неудобства. Однако, известны различные носимые устройства, предназначенные для контроля состояния здоровья и окружающих сотрудника параметров, таких как уровень кислорода, газов, радиации и другие. Среди таких носимых устройств известны умные каски, жилеты, перчатки, но исследования, использующие носимые устройства для идентификации действий сотрудника, еще слабо изучены и могут являться перспективным решением в будущем.

Анализ видеопотока и распознавание действий на основе алгоритмов компьютерного зрения широко распространены во многих областях исследования, в том числе промышленности [14, 67, 104, 126, 177, 183]. Например, существует категория исследований для распознавания действий на видео путем определения границ сцен в видеопотоке. Причем выделение границ на видео может быть выполнено на разном уровне, выделяя как отдельные сцены, так и более короткие действия – эпизоды (рисунок 2.1).

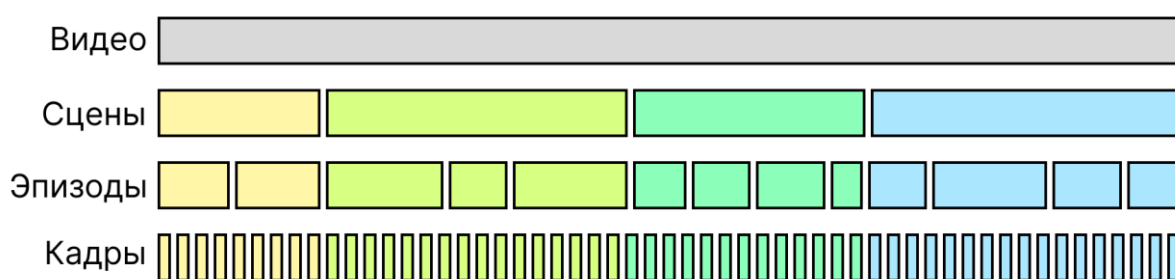


Рисунок 2.1 – Иерархия состава видео (составлено автором)

Проблема идентификации действий человека в видеопотоке является фундаментальной задачей в области компьютерного зрения. Среди используемых методов решения данной проблемы выделяется две категории: традиционные методы и методы машинного обучения.

2.1.1 Традиционные методы анализа видеопотока

Традиционные методы основаны на анализе изменения параметров пикселей в видеопотоке. В работе [97] предложен метод сравнения цветовых гистограмм соседних кадров для обнаружения резких переходов. Авторы отмечают, что метод эффективен для статичных сцен, но чувствителен к изменению освещения. Исследование [180] расширяет подход [97], добавляя весовые коэффициенты для разных цветовых каналов, что повышает устойчивость к локальным изменениям яркости.

В [148] авторы предлагают метод обнаружения сцены на основе векторов движения. В [83] для определения границ сцен используется анализ векторов скорости оптического потока: резкие изменения в распределении векторов интерпретируются как смена сцены. Авторы [101] комбинируют оптический поток с анализом текстур, что позволяет определять постепенные переходы, например,

наплывы кадров. В [149] обнаружение границ сцены в видеопотоке определяется путем анализа поведения переходов в видео, которые авторы разделили на два типа: резкий и постепенный переход. Первоначальное разделение проводится с помощью определения цветовой характеристики по локальному пороговому значению каждого сегмента. Затем из сегмента с помощью поиска признаков SURF-алгоритмом производится тонкая настройка резких и плавных переходов для снижения сложности алгоритма.

В [78] предложен алгоритм кластеризации векторов движения для выделения однородных кадров. Работа [136] демонстрирует, что фильтрация шумовых векторов движения повышает точность обнаружения границ в видеопотоке.

В [72] границы сцен определяются через анализ энергии высокочастотных компонент дискретного косинусного преобразования. Исследование [74] использует дискретное вейвлет-преобразование для выделения текстурных паттернов, характерных для переходов между сценами. В исследованиях [87] и [162] используются визуальные, аудио и текстовые признаки для создания комплексных векторов временных характеристик для сегментирования видео, а затем применяется косинусное сходство для выделения определенной темы в сегментированном видео.

В [93] выполняется классификация переходов между кадрами, например, плавное появление и исчезновение кадра, затемнение кадра, склейка кадров и другие и предложен алгоритм их обнаружения на основе пороговых значений цветовых характеристик видеопотока.

В исследовании [150] для определения границ сцены авторы определяют множество признаков, таких как место проведения действия, фоновая музыка, речь, а далее при большом количестве совпадающих признаков объединяют кадры в эпизоды, а затем в сцену.

В исследовании [100] кадры объединяются в группы только на основе их визуального сходства, и каждому кадру присваивается метка в соответствии с группой, к которой он принадлежит. Затем применяется алгоритм выравнивания

последовательности для обнаружения изменений в метках кадров, что позволяет получить окончательный результат сегментации сцены.

В [164] результат разделения видеопотока на сцены реализуется с помощью построения вероятностного графа. В [178] и [96] применяется метод марковских цепей Монте-Карло для сегментации видео на сцены. Данный метод вычисляет вероятность нахождения границы сцены на каждой итерации.

2.1.2 Методы машинного обучения для анализа видеопотока

В [116] авторы разработали архитектуру нейронной сети, предназначенную для создания пар признаков, на основе которых рассчитывается метрика евклидова расстояния для создания карты изменения признаков. При превышении выбранной метрики граничного значения расстояния определяется граница сцены.

Ученые в [153] решают задачу сегментации видео, применяя динамическое программирование. При этом авторы предложили метод оценки количества сцен в видео с помощью сингулярного разложения матрицы расстояний, полученной в результате обработки кадров видеопотока.

Исследование [155] демонстрирует обучение нейронной сети для сегментации объектов на видео и разделения его на сцены. В работе отмечается, что для получения наилучшей производительности и точности обнаружения объектов необходимо обучение нейронной сети на специальном наборе данных, состоящем из синтетических данных с сегментированными масками оригинальных фотографий.

В работе [103] предложены три модуля, которые включают в себя модуль, учитывающий отношения объектов в кадре, модуль, учитывающий масштаб объектов, и модуль перекрестного преобразования для более эффективного решения проблемы обнаружения изменений сцены.

В [114] разработали алгоритм, который автоматически разбивает видео на короткие сцены с использованием видео- и аудиодорожки и субтитров.

Предложенный метод [135] разделения видео на сцены, как и многие другие, обучает нейронную сеть для извлечения особенностей на кадре из видеопотока и разделяет кадры на основе группировки этих особенностей.

Исследование [79] описывает способ разделения на сцены с помощью метода OSG (Optimal Sequential Grouping). Ученые расширили возможности данного метода для обучения нейронных сетей.

Ученые из IBM из каждого кадра извлекают репрезентативную характеристику. На основе этих признаков создается матрица расстояний, на основе которой может быть выполнен оптимальный алгоритм последовательной группировки, в результате которого получается разделение видеопотока на сцены [152].

В [91] предлагается способ извлечения ключевых кадров и обнаружения границ видео на основе блоков вейвлет-коэффициентов Фабера-Шодера и сингулярного разложения.

В [145] ученые разработали систему, в которой определяют псевдограницу из последовательности кадров путем разбиения ее на две непрерывные, непересекающиеся подпоследовательности и используют псевдограницу для облегчения предварительного обучения нейросетевой модели.

В [176] предлагают модель, основанную на согласованности сцен, для получения лучших результатов по разделению видео на эпизоды для продолжительных видео.

В [81] применяют две предобученные модели нейронных сетей в сочетании с LSTM сетью для определения границ на видео на основе вычисления схожести признаков, используя евклидово расстояния в качестве метрики.

В [73] используется алгоритм PCA для извлечения характеристик видеок кадров, анализируются наиболее значимые собственные векторы и собственные значения. Для определения границ кадра используется алгоритм расчета расстояния между соседними видеок кадрами в зависимости от их собственных векторов и собственных значений, а для повышения точности обнаружения, границы ложного обнаружения рассматриваются и классифицируются с помощью сверточной нейронной сети.

В [182] для обнаружения границ кадра авторы используют правило масштабирования сверху вниз, цветовые характеристики изображения, локальные дескрипторы и комбинируют алгоритм выделения области движения.

В [123] применяют анализ признаков, таких как коэффициент изменения краев, дескриптор цветового расположения и дескрипторы ключевых точек SIFT для повышения уровня точности определения границ сцен в видео.

Среди рассмотренных научных исследований сделан вывод, что общий подход заключается в поиске репрезентативных признаков, которые затем разделяются определенным методом. Поиск и расчет признаков для каждой области исследования и поставленной задачи отличается, однако последующее их разделение может быть выполнено простыми, известными и зарекомендованными методами [3].

2.1.3 Особенности анализа видеопотока, содержащего процессы технического обслуживания и ремонта

В настоящее время ТОиР выполняется оперативным персоналом вручную либо с использованием определенного инструмента, поэтому в качестве характерного признака, на основе которого возможна идентификация действий, является анализ изменения координат рук в видеопотоке. Известно множество способов решения данной задачи с использованием алгоритмов компьютерного зрения и моделей машинного обучения. Среди методов распознавания действий человека наиболее близким к задаче идентификации производственных процессов ТОиР является направление исследований, связанное с анализом взаимодействия объектов в руках человека. Например, в исследовании [134] на основе анализа цветного изображения совместно с картой глубины распознают объект, который держит человек в руках. Похожее исследование представлено в [113, 117, 138, 161], но отличается тем, что анализ изображения производится путем обработки ключевых точек на руке и поиском объекта взаимодействия в трехмерном пространстве. В [118, 137, 144] показан способ распознавания действия по восстановлению облака точек рук в трехмерном пространстве. В исследованиях [97, 168] рассмотрен способ распознавания места контактов руки с объектом.

Представлена модель, способная определить места контакта руки как на самом объекте, так и силу давления на объект в местах прикосновения. В исследовании [165] авторы рассматривают способ распознавания действий человека от первого лица по движению его рук и отмечают, что данная проблема сложнее в реализации, чем распознавание действий от третьего лица из-за отсутствия информации о позе человека и других данных, кроме рук, которые видит камера.

Ввиду разнообразия промышленного оборудования, техническое обслуживание и ремонт которого может выполняться как на месте эксплуатации, так и в ремонтной зоне, алгоритм идентификации действий человека должен учитывать следующие особенности процесса ТОиР:

- обрабатывать видеопоток, содержащий координаты рук от первого и третьего лица;
- учитывать использование рабочего инструмента в руках;
- учитывать использование перчаток и средств индивидуальной защиты при выполнении ТОиР;
- масштабирование решения для различных типов промышленного оборудования;
- мобильность при необходимости перемещения рядом с промышленным оборудованием для выполнения ТОиР;
- идентификация действий в режиме реального времени.

Таким образом, для идентификации действий человека, выполняющего ТОиР промышленного оборудования, необходимо проводить анализ видеопотока, содержащего перемещение рук сотрудника, с целью вычисления набора признаков, характеризующего выполняемые ручные операции [130].

2.1.4 Анализ видеопотока в алгоритме идентификации производственных процессов технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования

На рисунке 2.2 представлена блок-схема алгоритма идентификации производственных процессов [21, 46]. Условно алгоритм можно разделить на четыре этапа: анализ видеопотока, вычисление набора признаков, обработка

набора признаков, обучение модели машинного обучения, результатом которой является идентификация выполняемого действия.

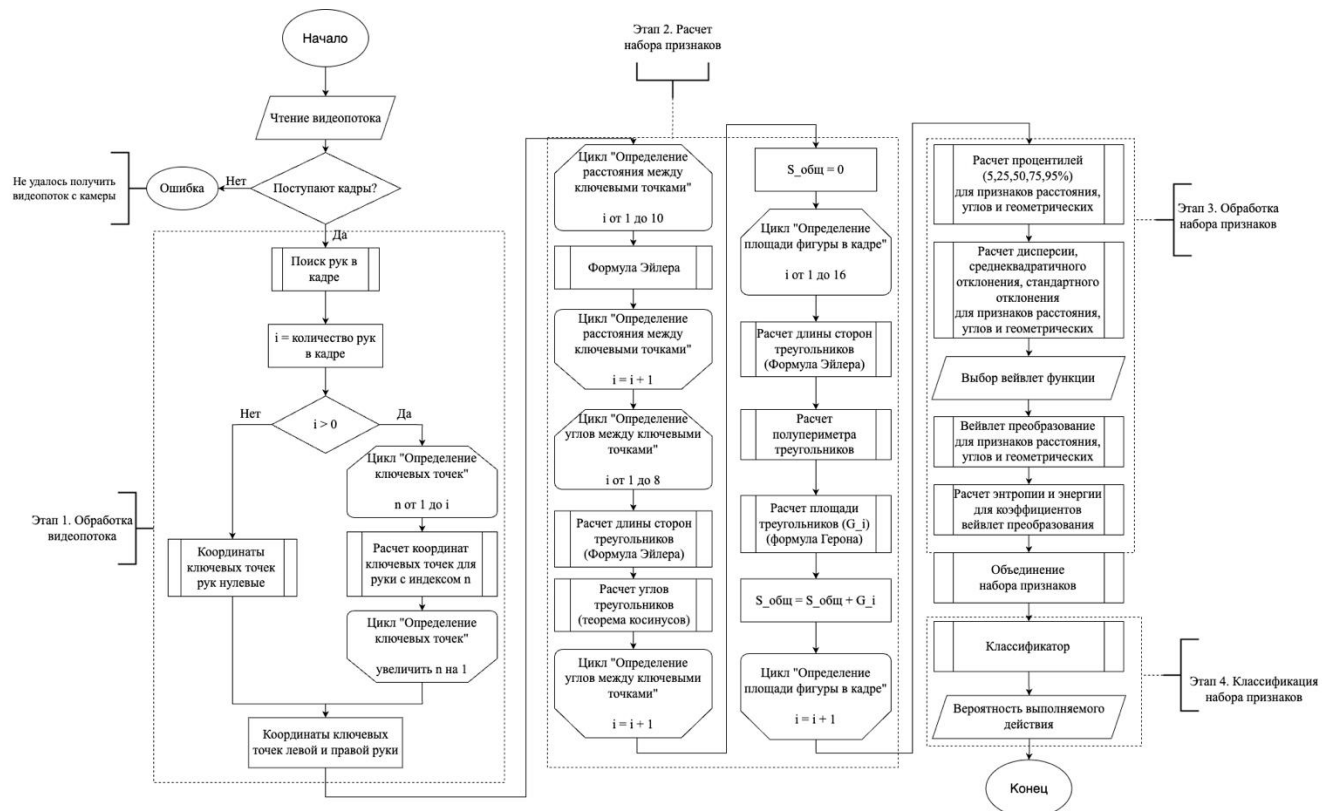


Рисунок 2.2 – Блок-схема алгоритма идентификации производственных процессов (составлено автором)

На основе предобученных моделей сверточных нейронных сетей выполняется поиск рук в видеопотоке [105, 179]. Первая модель выполняет поиск рук на изображении и возвращает часть изображения, на котором была найдена рука человека. Затем в этой части изображения вторая модель определяет 21 ключевую точку руки, как показано на рисунке 2.3.

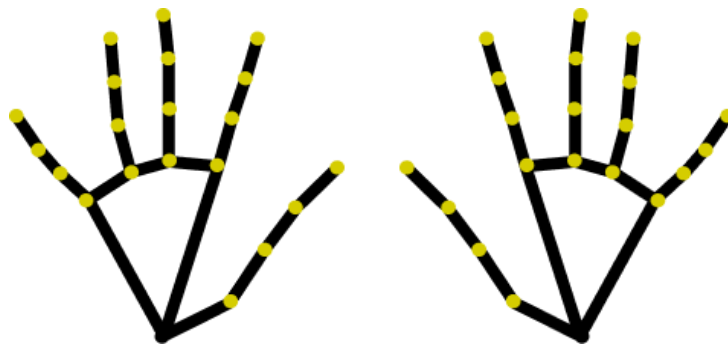


Рисунок 2.3 – Ключевые точки рук (составлено автором)

Таким образом, первичная обработка видеопотока заключается в поиске и отслеживании рук человека с целью получения зависимости положения рук от

времени, то есть функции координат по оси X и Y относительно кадра от времени. Решение поставленной задачи достигается путем поиска ключевых точек, по которым можно идентифицировать необходимый объект на изображении, а затем отслеживать направление его перемещения. Схематично данный этап может быть изображен следующим образом (рисунок 2.4).

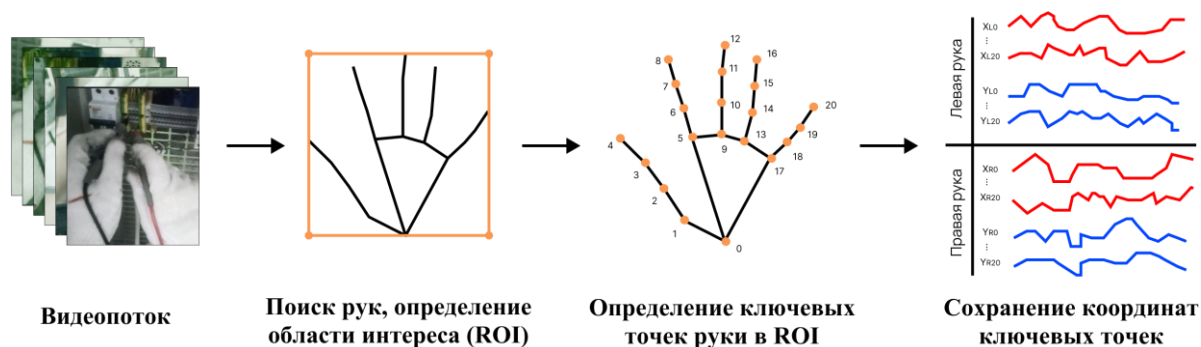


Рисунок 2.4 – Анализ видеопотока для сбора и предобработки данных
(составлено автором)

Далее полученные координаты необходимо обработать таким образом, чтобы получить набор признаков, достаточный для их классификации моделью машинного обучения с необходимой точностью.

2.1.5 Метрики качества классификации признаков в моделях машинного обучения

Оценка качества классификации модели машинного обучения основана на расчете нескольких метрик, главной составляющей которых является принадлежность результатов классификации к одной из четырех групп ответов:

- модель верно определила принадлежность к классу (TP – True Positive);
- модель верно определила, что объект не принадлежит к определенному классу (TN – True Negative);
- модель неверно определила принадлежность к классу (FP – False Positive);
- модель неверно определила, что объект не принадлежит к определенному классу (FN – False Negative).

Таким образом, результаты классификации модели можно представить в виде таблицы 2.1.

Таблица 2.1 – Представление результатов классификации моделью машинного обучения [47]

Результат классификации модели машинного обучения	Принадлежность к классу	
	TP	FP
	FN	TN

Первая метрика оценки качества классификации, называемая точностью классификации, рассчитывается по формуле 2.1:

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN}, \quad (2.1)$$

где *accuracy* – доля правильных ответов модели; *TP* – доля верно определенных принадлежностей к классам; *TN* – доля верно определенных объектов, не принадлежащих к рассматриваемым классам; *FP* – доля неверно определенных принадлежностей к классам; *FN* – доля неверно определенных объектов, не принадлежащих к рассматриваемым классам.

Исходя из формулы расчета данной метрики, можно отметить, что в случаях несбалансированности классов, то есть в случаях, когда количество данных для класса №1 сильно много больше количества данных для класса №2, модель может угадать несколько классов №2 и значение точности будет высоким, что может не соответствовать действительности.

Вторая метрика оценки качества классификации, называемая Точность и Полнота (*Precision&Recall*) классификации, рассчитывается по формулам 2.2-2.3:

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP} \quad (2.2)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} \quad (2.3)$$

На основе точности и полноты вычисляется метрика, называемая F1-мера, учитывающая одновременно два этих показателя (2.4).

$$F1 = \frac{2 \cdot Precision \cdot Recall}{Precision + Recall} \quad (2.4)$$

Таким образом, данная метрика показывает, насколько хорошо модель верно классифицирует класс относительно всех классов в наборе данных.

Третьей метрикой качества классификации является метрика ROC-кривая, для которой рассчитывается площадь под кривой. Кривая строится в координатах *TPR* по оси ординат и *FPR* по оси абсцисс, где *TPR* (True Positive Rate) показывает

отношение верно классифицированных объектов класса к общему числу элементов этого класса, что равняется величине *Recall*, а *FPR* (False Positive Rate) показывает долю неверное классифицированных объектов и вычисляется по формуле 2.5:

$$FPR = \frac{FP}{FP+TN}, \quad (2.5)$$

2.2 Обоснование набора признаков для обучения моделей классификации действий человека при выполнении технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования

Для данных, полученных на предыдущем этапе алгоритма и представляющих набор из 84 временных рядов (42 для левой и правой руки, где 21 параметр для координат по оси X и еще 21 параметр для координат по оси Y), вводятся и рассчитываются признаки, которые характеризуют положение рук в кадре. Описанная задача может быть решена методами, применяемыми для распознавания жестов. В этом случае необходимо рассмотреть признаки, которые позволят количественно охарактеризовать положение руки в кадре, а затем рассмотреть изменение этих признаков во времени. В качестве таких признаков рассмотрены три группы: признаки расстояний, признаки углов и геометрические признаки [89].

2.2.1 Признаки расстояния

Признаки расстояния, изображенные на рисунке 2.5, показывают расстояние между ключевыми точками на каждом пальце руки и рассчитываются по формуле 2.6.

$$d = \sqrt{(x_i^2 - x_c^2)^2 + (y_i^2 - y_c^2)^2}, \quad (2.6)$$

где d – геометрическое расстояние между точками x_i и x_c , которые характеризуют положение ключевых точек по оси X, а y_i и y_c – положение ключевых точек по оси Y, кол-во пикселей.

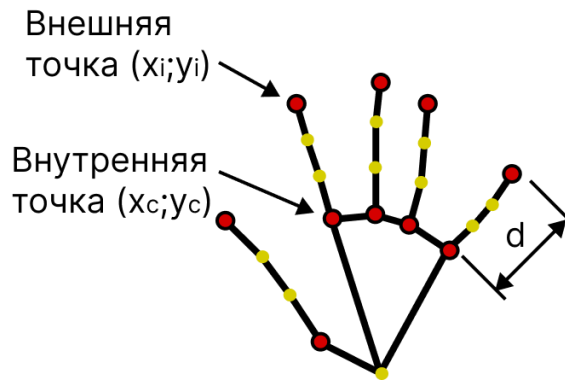


Рисунок 2.5 – Признаки расстояния (составлено автором)

Соответственно, результатом расчета признаков расстояния является 10 временных рядов, где 5 из них характеризуют изменение расстояния между ключевыми точками для левой руки и другие 5 – для правой руки.

2.2.2 Признаки углов

Признаки углов представляют собой углы треугольников, которые образуются между пальцами рук. Соединяя точку, расположенную на запястье руки с точками на крайней фаланге пальцев, образуется четыре треугольника (рисунок 2.6). Все углы треугольников являются искомыми признаками и рассчитываются по теореме косинусов следующим образом (формула 2.7):

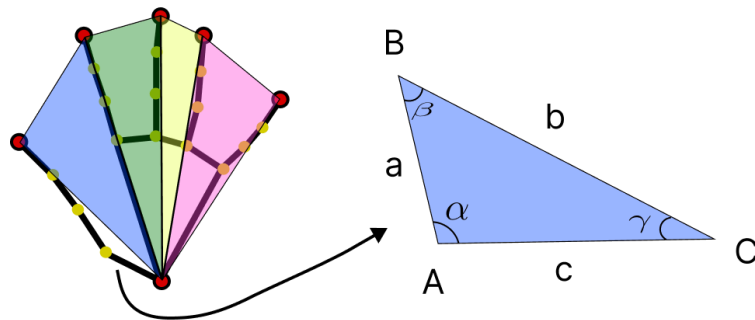


Рисунок 2.6 – Признаки углов (составлено автором)

$$\begin{aligned}
 \alpha &= \arccos\left(\frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc}\right) \\
 \beta &= \arccos\left(\frac{a^2 + c^2 - b^2}{2ac}\right) \\
 \gamma &= \arccos\left(\frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab}\right),
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

где α, β, γ – углы треугольника между сторонами BC, AC и AB, град.

2.2.3 Геометрические признаки

Геометрическим признаком является площадь геометрической фигуры, которую образует рука в кадре. Определение площади геометрической фигуры заключается в разделении фигуры сначала на четырехугольники путем объединения ближайших ключевых точек, а затем полученные четырехугольники делятся на два треугольника, как показано на рисунке 2.7. Площадь треугольника вычисляется по формуле Герона (формула 2.8).

$$G = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}, \quad (2.8)$$

где $p = \frac{a+b+c}{2}$; p – полупериметр треугольника, пиксели; a, b, c – стороны треугольника, пиксели.

Полученные площади треугольников складываются для определения площади четырехугольника и затем складываются площади четырехугольников, определяя площадь всей фигуры, которую образует рука в кадре.

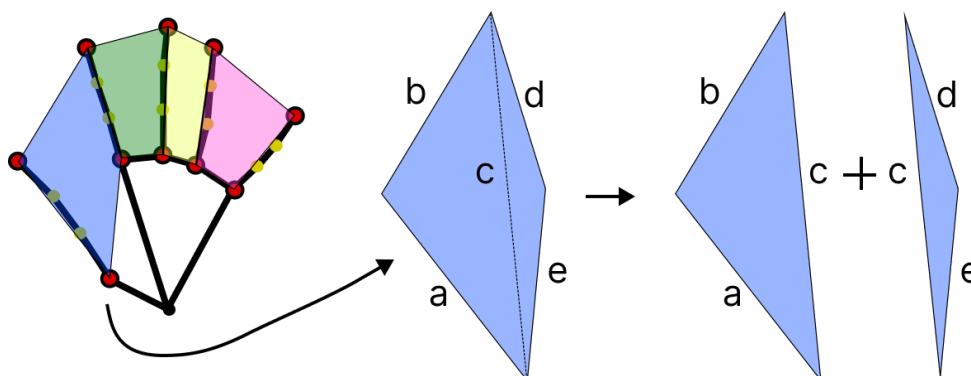


Рисунок 2.7 – Геометрические признаки (составлено автором)

Следующим этапом подготовки данных является расчет параметров, которые могут описать значения временных рядов, представляющих три группы признаков. Согласно теории анализа временных рядов, возможно их изучении во временной, частотной и временно-частотной области [160]. Поскольку изучаемые временные ряды не имеют гармонической составляющей и природа сигнала близка к хаотичному, непредсказуемому поведению, то изучение частотной составляющей далее не рассматривалось. В этой связи для описания временных рядов набора признаков была рассмотрена временная и частотно-временная область.

Далее раскрытие и обоснование набора признаков в алгоритме идентификации производственных процессов рассматривается на примере четырех действий по выполнению технического обслуживания ПЛК в шкафу управления, представленных на рисунке 2.8.

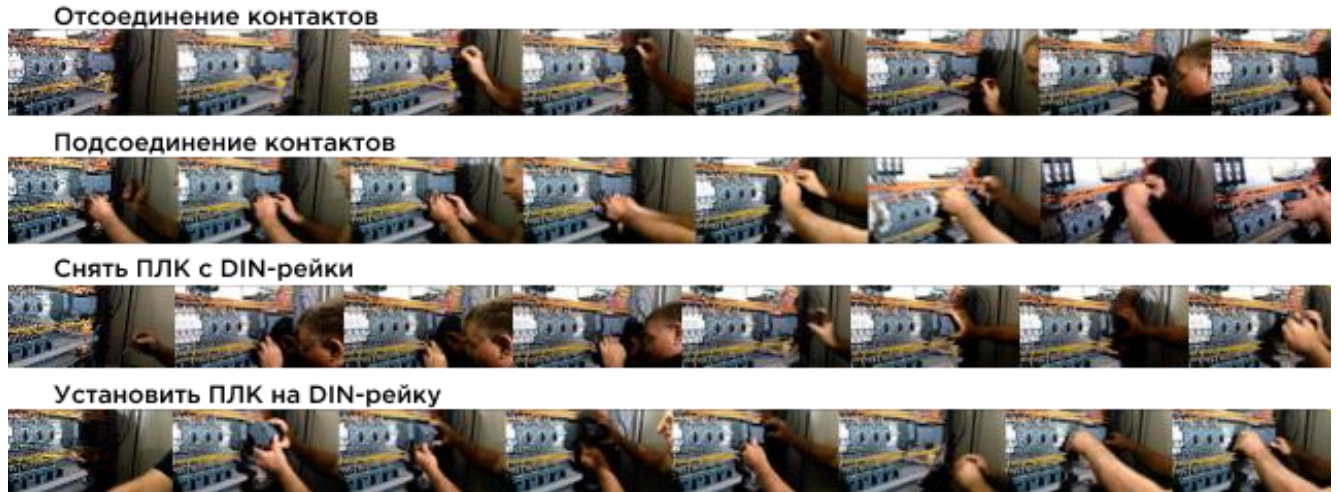


Рисунок 2.8 – Действия, выполняемые при замене ПЛК (составлено автором)

2.2.4 Выбор статистических параметров для описания временной области признаков

Процентили временного ряда представляют такое число N , которое показывает, что $N\%$ значений во временном ряду меньше него. Частный случай процентиля – это медиана временного ряда, которая означает 50 % процентиль. Процентили позволяют оценить разброс данных во временном ряду и рассмотреть разброс данных применительно к значениям рассчитанных признаков для определяемого действия.

Дисперсия σ^2 для рассчитанных признаков показывает разброс значений относительно их математического ожидания и вычисляется по формуле 2.9:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2, \quad (2.9)$$

где N – длина временного ряда, x_i – величина отдельного значения во временном ряду, μ – математическое ожидание.

Среднеквадратическое отклонение σ вычисляется как квадратный корень из дисперсии или по формуле 2.10:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}, \quad (2.10)$$

Стандартное отклонение s показывает среднеквадратическое отклонение рассчитанных значений признаков относительно их среднеарифметического значения и вычисляется по формуле 2.11:

$$s = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}, \quad (2.11)$$

где N – длина временного ряда, x_i – величина отдельного значения во временном ряду, $\bar{x}$ – среднее арифметическое значение во временном ряду.

Эти временные характеристики позволяют синтетически описать набор данных, предоставляя ключевую информацию о структуре временного ряда и учесть его динамические изменения с течением времени.

Для представленных на рисунке 2.8 действий по замене ПЛК в шкафу управления рассчитаны статистические параметры для временных рядов, представляющих введенные три группы признаков – признаки расстояния, признаки углов и геометрические признаки. Результаты расчетов приведены на рисунках 2.9-2.12. Приведенные результаты расчетов показывают количественное различие статистических параметров между классами. Например, по статистическим параметрам временной области признаков расстояния (рисунок 2.9) видно, что левая рука человека была больше задействована в выполнении действий, поскольку значения перцентилей и средние значения для левой руки больше, чем для правой по всем классам. Это объясняется расположением камеры, которая снимала выполнение действий с левой стороны от человека. При этом значения параметров между классами не одинаковые и имеют количественные различия, что говорит о возможности их классификации.

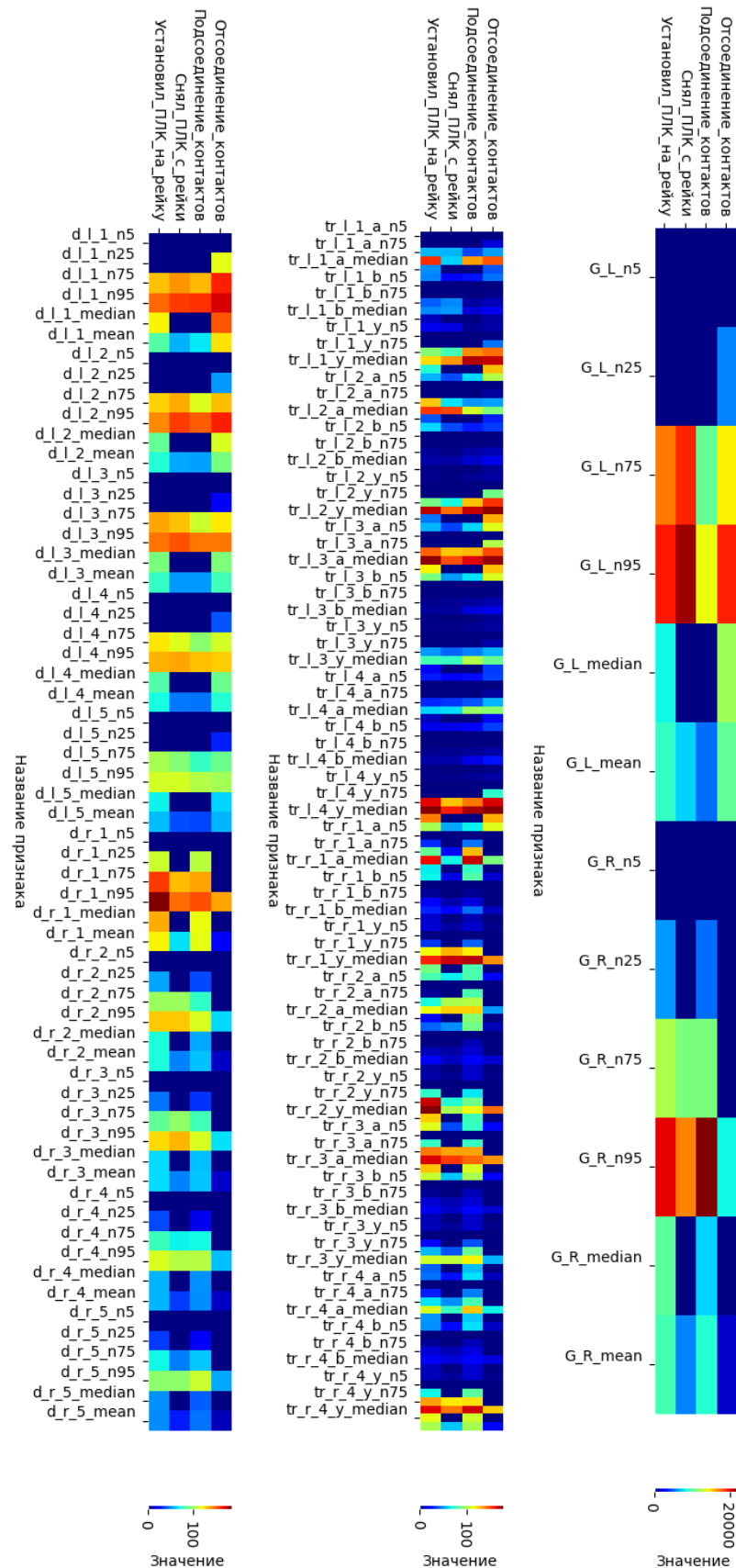


Рисунок 2.9 – Статистические параметры временных рядов признаков расстояния (слева), признаков углов (по центру), геометрических признаков (справа) (составлено автором)

Более яркое представление о задействованной левой руке в выполнении представленных действиях данного примера показывают значения дисперсии и стандартного отклонения, рассчитанные для временных рядов признаков расстояния. По рисунку 2.10 видно, что полученные значения левой руки превосходят значения правой руки. При этом также общий набор значений для каждого класса индивидуален.

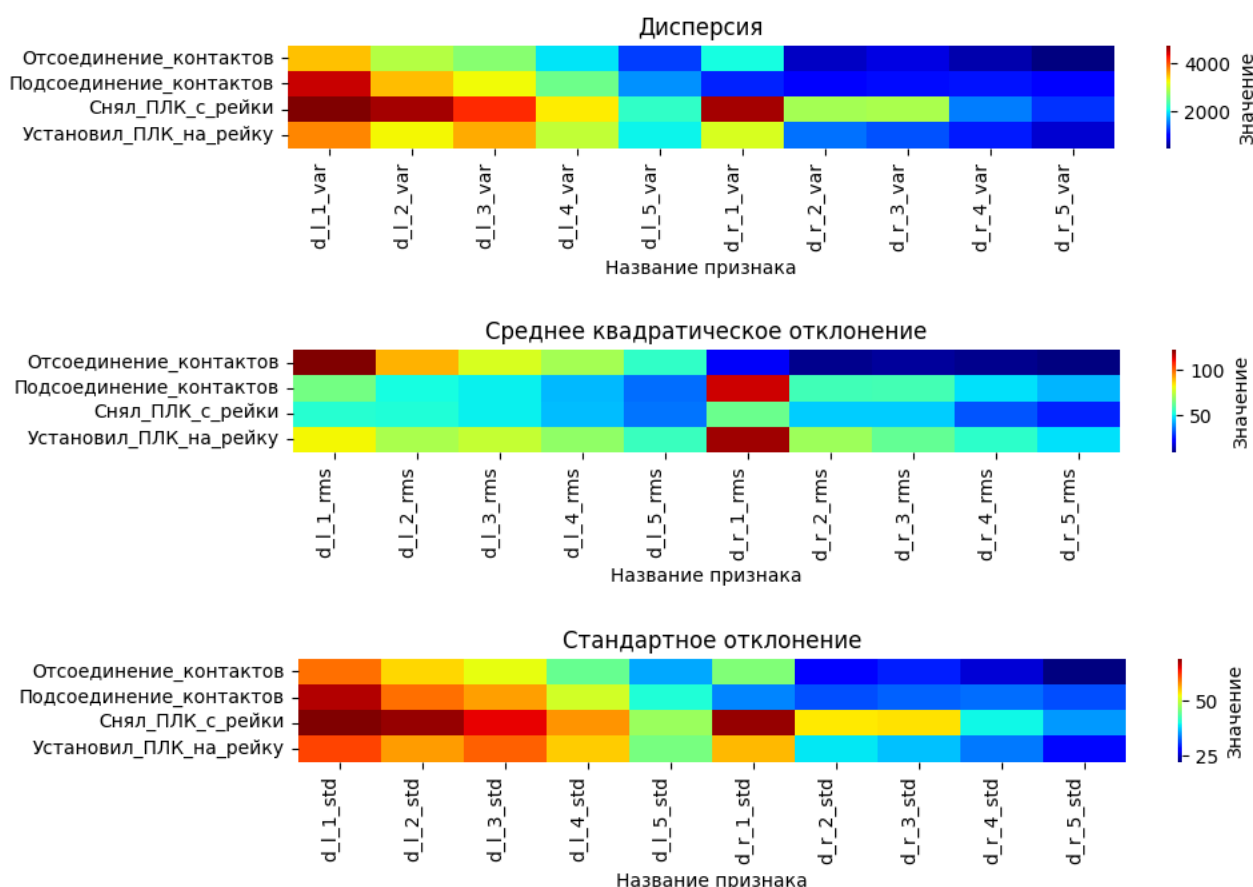


Рисунок 2.10 – Статистические параметры временных рядов признаков расстояния (составлено автором)

На рисунке 2.11 показаны статистические параметры для признаков углов. Полученные значения представляют различия в различном положении руки в кадре видеопотока, то есть различных жестах рук при выполнении данных видов работ. Это говорит о том, что изменение сгибания пальцев рук и появлении руки в определенном положении различается в этих классах.

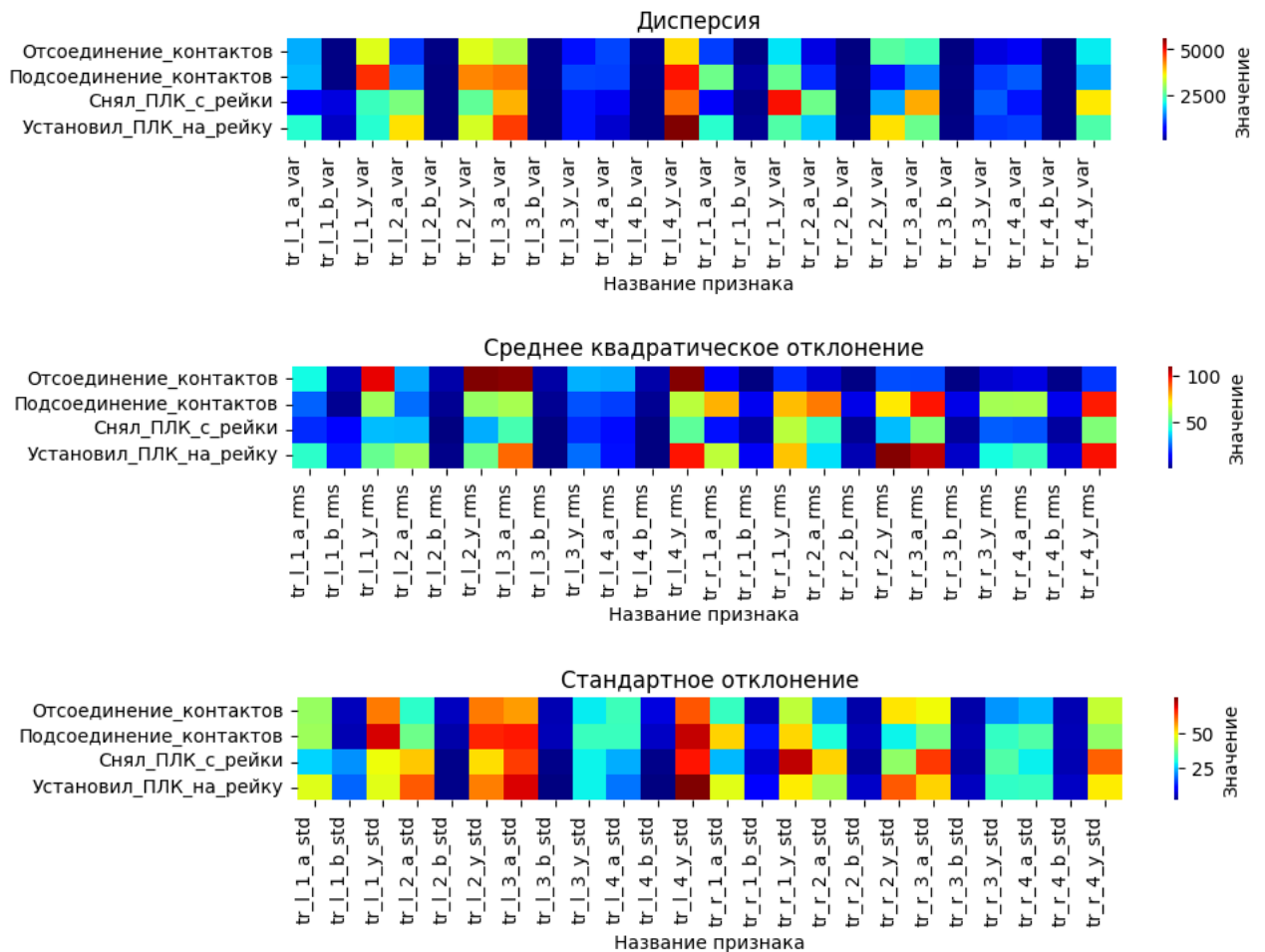


Рисунок 2.11 – Статистические параметры временных рядов признаков углов
(составлено автором)

Подобный вывод можно сделать на основе статистических параметров геометрических признаков (рисунок 2.12). Изменение площади, занимаемой руками в кадре видеопотока, может говорить о разном положении руки в кадре при выполнении определенных действий.

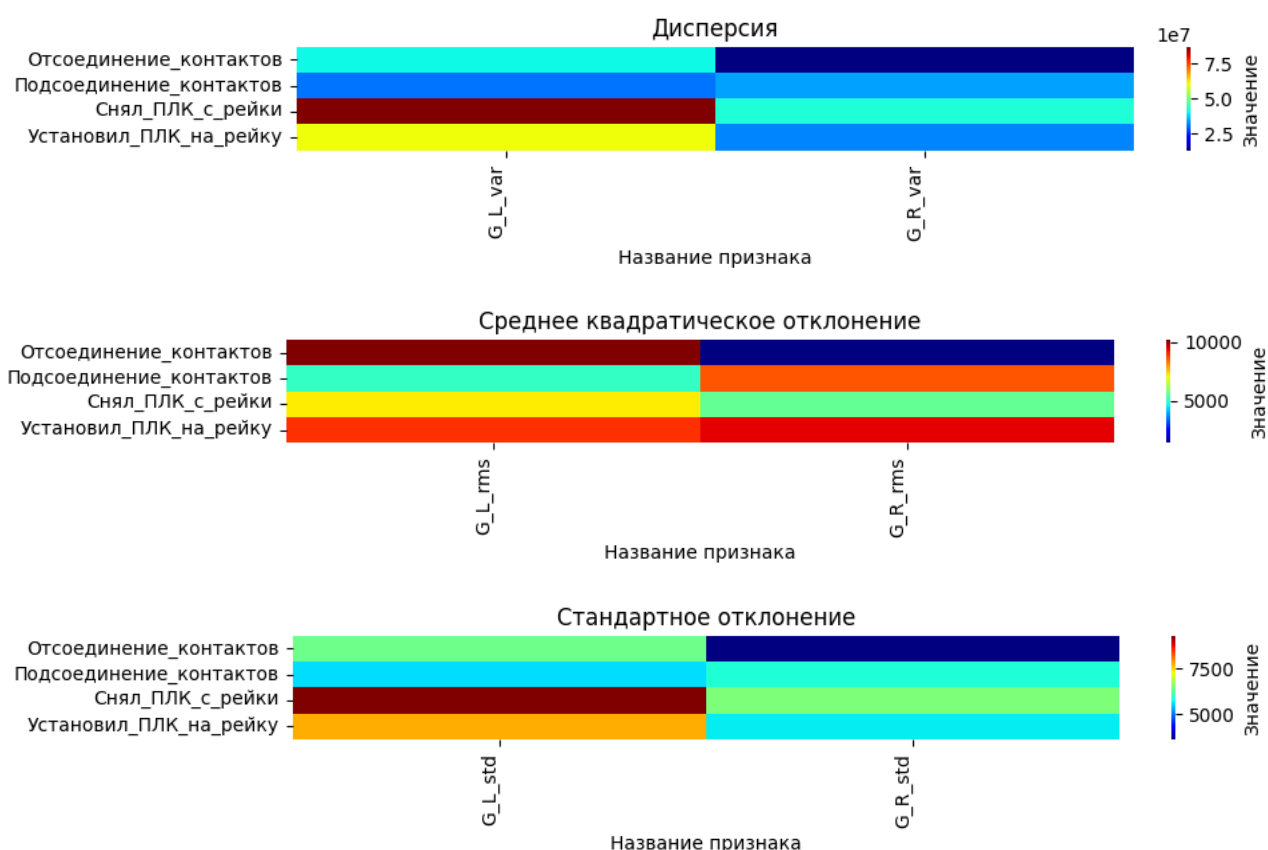


Рисунок 2.12 – Статистические параметры временных рядов геометрических признаков (составлено автором)

Таким образом, совокупность статистических параметров временных рядов выделенных групп признаков позволяет выделить определенное количество значений, описывающих изменение положения и движения рук во времени. Установленная зависимость временной области введенных групп признаков может использоваться при решении задачи идентификации действий человека с помощью анализа видеопотока методами машинного обучения.

2.2.5 Выбор функции вейвлет-преобразования для описания частотно-временной области признаков

Вейвлет-преобразование позволяет анализировать данные на различных уровнях детализации. В диссертационном исследовании акцент сделан на использование непрерывного вейвлет-преобразования, что обусловлено рядом причин. Непрерывное вейвлет-преобразование обеспечивает более детализированное представление сигнала в временной и частотной областях, что особенно важно для анализа сигналов с кратковременными и непредсказуемыми

изменениями. Применение непрерывного вейвлет-преобразования позволяет выявить локальные особенности и аномалии, которые могут быть утеряны при использовании дискретного вейвлет-преобразования, ориентированного преимущественно на декомпозицию сигнала на отдельные частотные диапазоны. Для количественной характеристики коэффициентов вейвлет-преобразования используется расчет энтропии и энергии.

Энтропия коэффициентов – показатель хаотичности и непредсказуемости временного ряда. Расчет энтропии выполняется по формуле (2.12):

$$H = -\sum(pk \cdot \log(pk)), \quad (2.12)$$

где pk – вероятность появления отдельного коэффициента вейвлет-преобразования.

Энергия коэффициентов – сумма квадратов коэффициентов, отображающая плотность энергии на каждом уровне декомпозиции и позволяющая оценить вклад каждой частоты в общее поведение ряда рассчитывается по формуле 2.13:

$$E = \sum coeff_i^2, \quad (2.13)$$

где $coeff$ – коэффициенты вейвлет преобразования.

Для описания частотно-временной области признаков рассматривались следующие функции для непрерывного вейвлет- преобразования:

- комплексный Гауссов вейвлет;
- комплексный вейвлет Морле;
- вейвлет В-сплайна;
- Гауссов вейвлет первого порядка;
- Мексиканская шляпа;
- вейвлет Морле;
- вейвлет Шеннона.

На рисунке 2.13 представлено сравнение результатов вейвлет-преобразования для набора признаков, рассчитанных для четырех действий, обозначенных на рисунке 2.8.

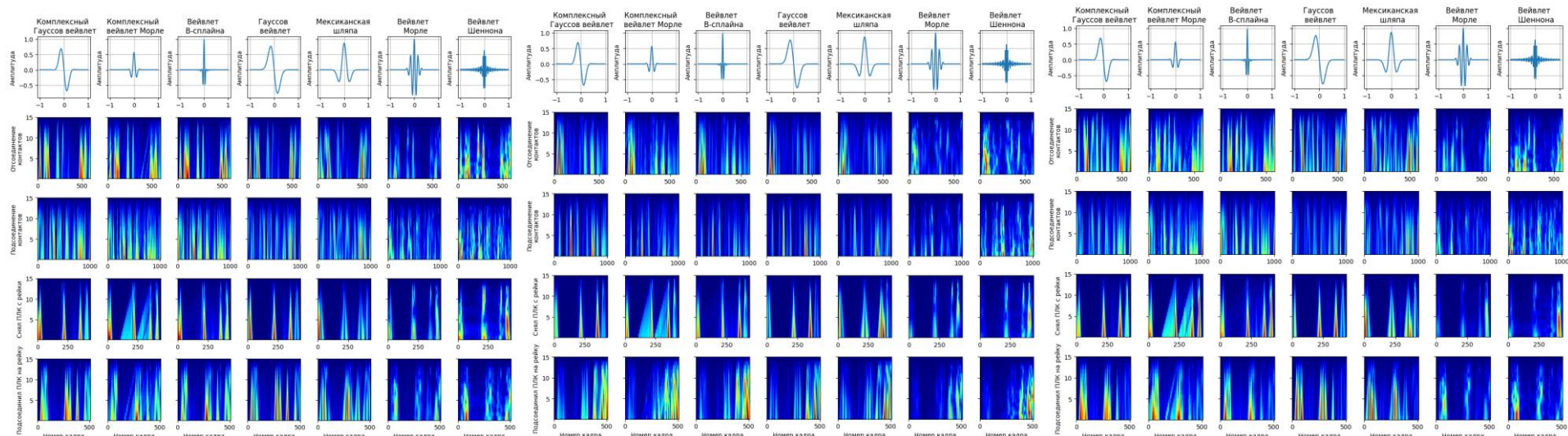


Рисунок 2.13 – Сравнение функций вейвлет-преобразования при обработке набора признаков (сверху – признаки расстояния; по центру – признаки углов; снизу – геометрические признаки) (составлено автором)

Выбор диапазона частот обуславливается частотой кадров, при котором обновляются кадры в видеопотоке. Поскольку приведенные в примере видеозаписи сделаны с частотой в 30 кадров в секунду, то согласно теореме Котельникова верхний диапазон частоты вейвлет-преобразования рассматривается как половина от частоты обновления кадров. Анализ спектрограмм вейвлет-преобразования набора признаков показывает, что разные вейвлеты дают разные результаты разложения сигнала. Вейвлет Морле и комплексные вейвлеты Гаусса обеспечивают хорошую временно-частотную локализацию. Вейвлет Шеннона дает более «размытую» картину. Вейвлет «Мексиканская шляпа» выделяет резкие изменения.

На основе полученных вейвлетов рассчитаны значения энтропии и энергии для всех определенных признаков. На рисунке 2.14 представлено их сравнение, где в каждом наборе признаков группируются значения по идентифицируемым классам.

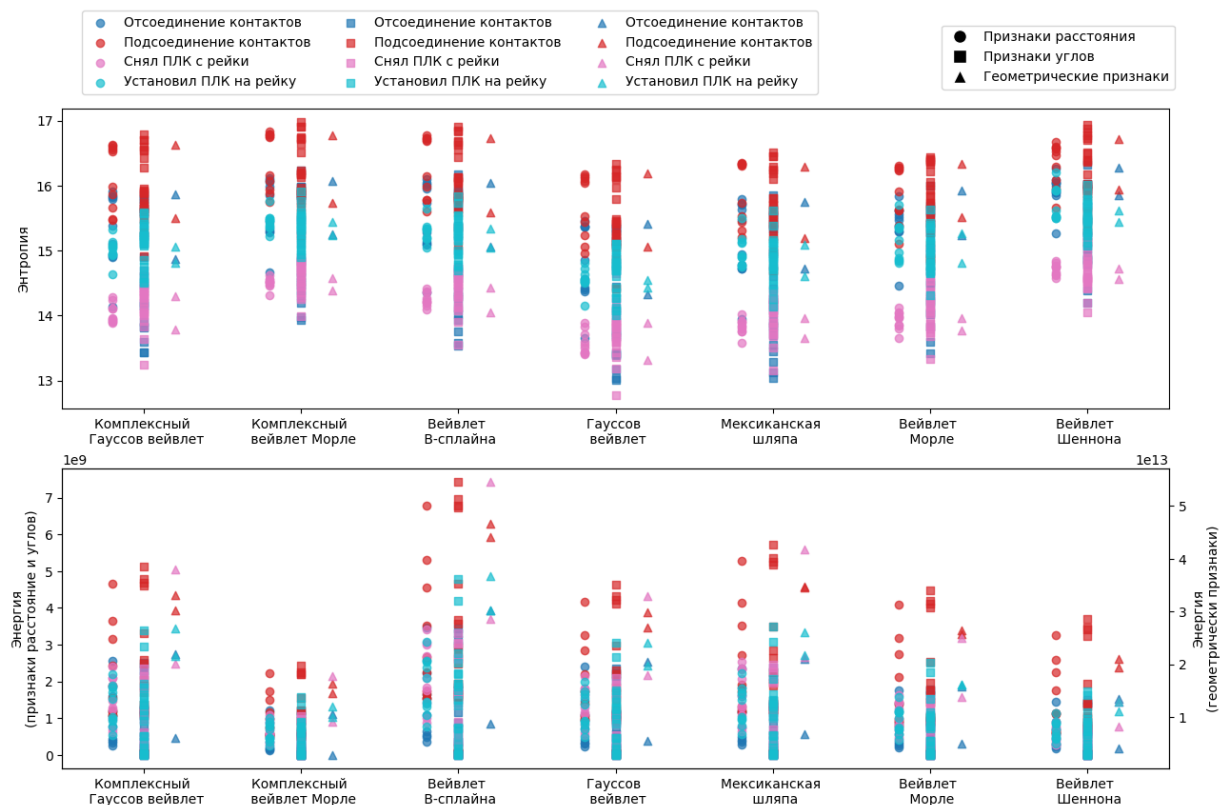


Рисунок 2.14 – Сравнение энтропии и энергии коэффициентов вейвлет-преобразования для признаков расстояния, углов и геометрических
(составлено автором)

Тем самым сделан вывод о целесообразности использования значений энтропии и энергии для описания частотно-временной области признаков, используемых для классификации действий. При этом стоит отметить, что выбор функции вейвлет-преобразования может зависеть от идентифицируемых действий человека.

Выбор функции вейвлет-преобразования выполняется на основе расчета значений силуэт коэффициента, который показывает качество группировки трех групп признаков по четырем кластерам (действиям). На рисунке 2.15 показаны результаты расчета силуэт коэффициента для значений энтропии и энергии для сравниваемых вейвлет- функций. По наибольшему абсолютному и среднему значению выбирается вейвлет-функция, которая наилучшим образом позволяет разделить значения энтропии и энергии на определяемое количество кластеров, то есть действий в наборе данных. По результатам расчета силуэт коэффициента вейвлет-функция «Мексиканская шляпа» имеет наибольшее значение коэффициента.

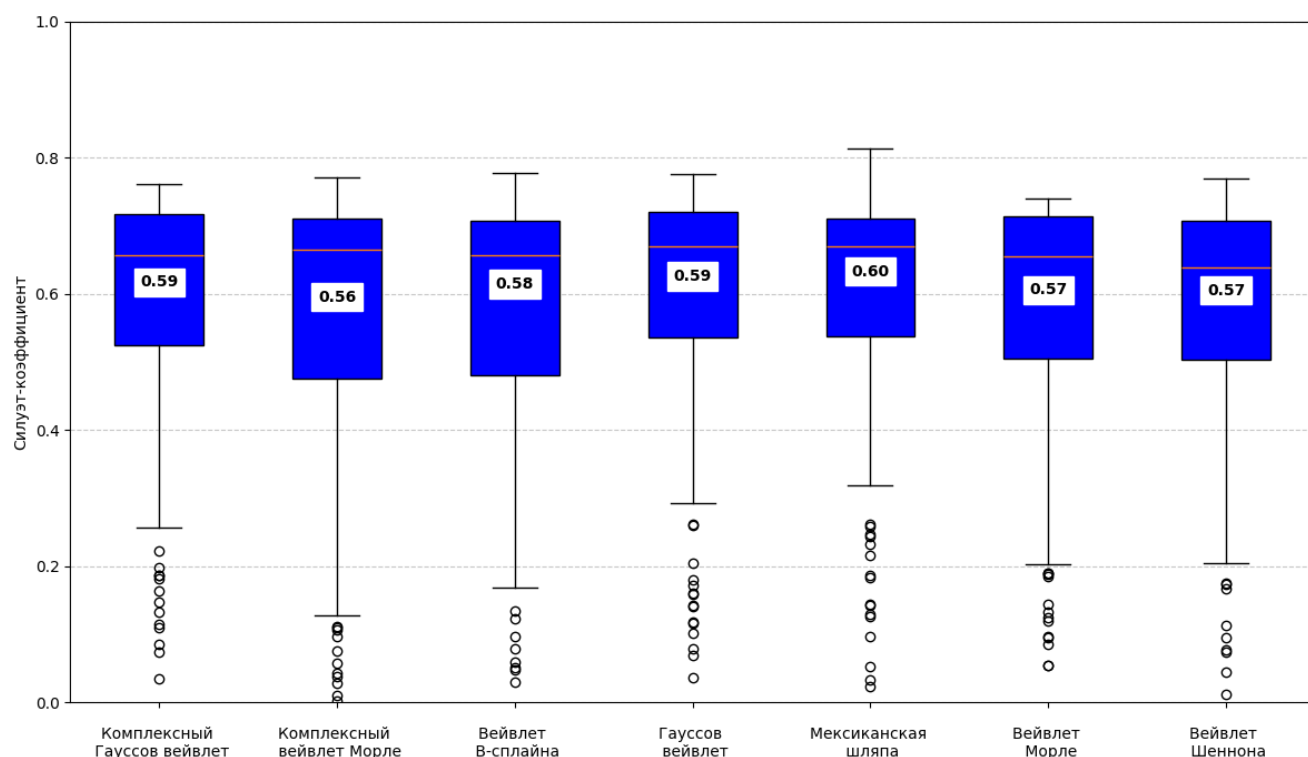


Рисунок 2.15 – Распределение значений силуэт коэффициента для значений энтропии и энергии при применении различных вейвлет- функции к трем группам признаков (составлено автором)

По каждому признаку в наборе для вейвлет-функции «Мексиканская шляпа» представлены значения энтропии и энергии, которые показаны ниже на рисунках 2.16-2.20. По оси абсцисс откладываются энтропии и энергии для соответствующих признаков, по оси ординат – численные значения этих признаков. Для наглядности они соединены между собой пунктирной линией. Полученные значения дают наглядную иллюстрацию численных различий в действия, описываемых предложенными признаками в алгоритме идентификации.

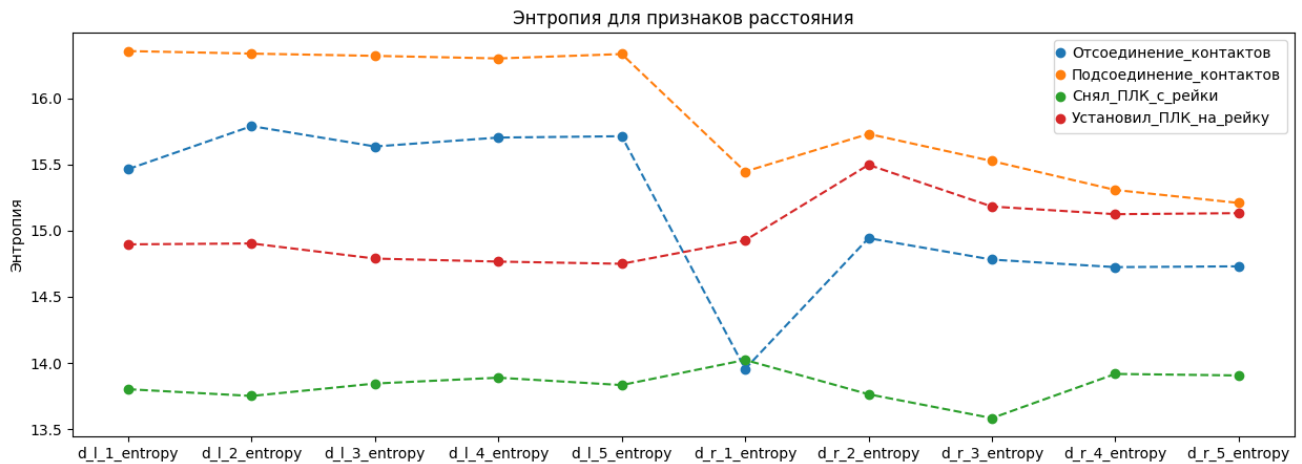


Рисунок 2.16 – Энтропия коэффициентов вейвлет- преобразования признаков расстояния (составлено автором)

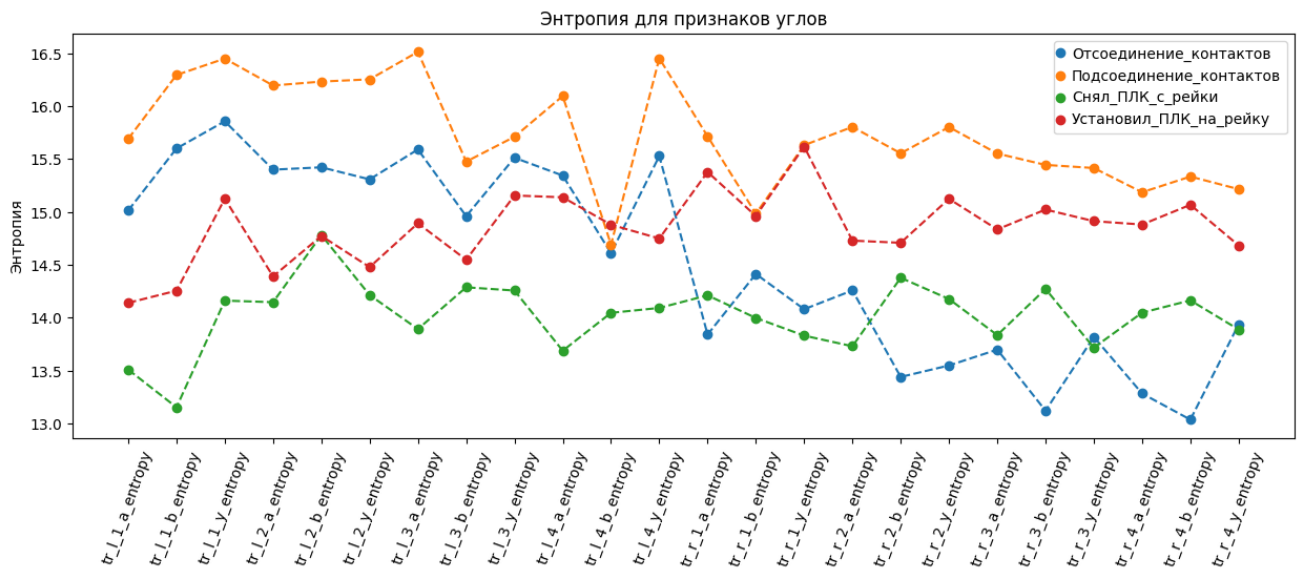


Рисунок 2.17 – Энтропия коэффициентов вейвлет- преобразования признаков углов (составлено автором)

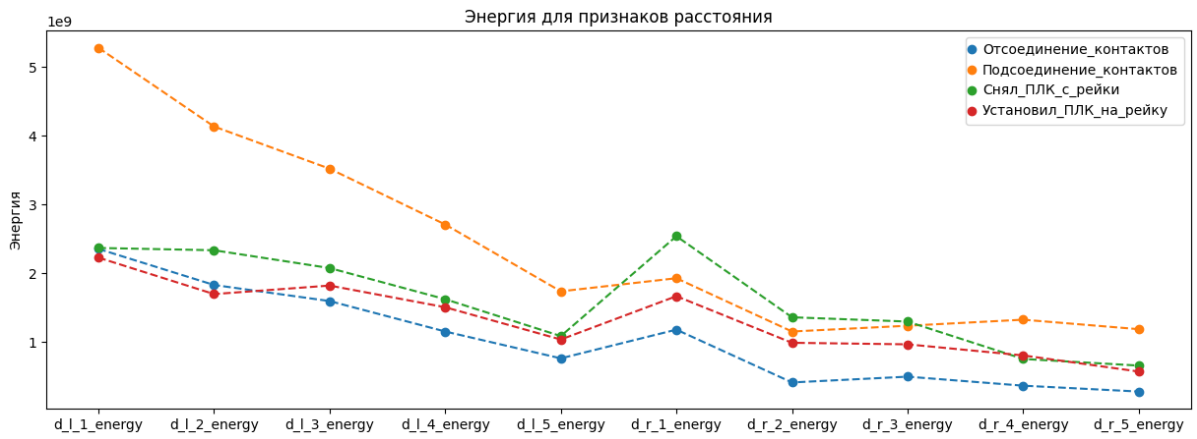


Рисунок 2.18 – Энергия коэффициентов вейвлет- преобразования признаков расстояния (составлено автором)

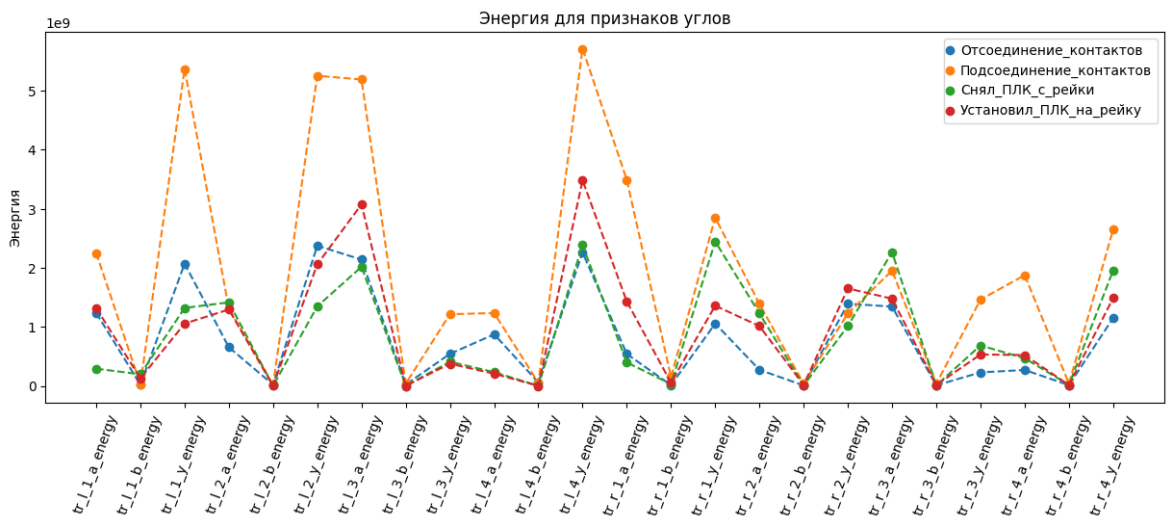


Рисунок 2.19 – Энергия коэффициентов вейвлет- преобразования признаков углов (составлено автором)

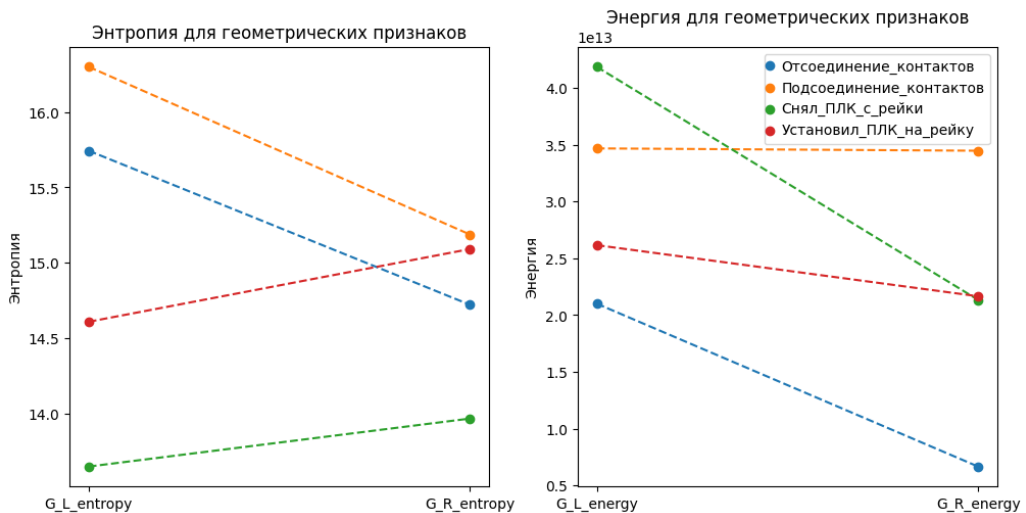


Рисунок 2.20 – Энтропия (слева) и энергия (справа) коэффициентов вейвлет- преобразования геометрических признаков (составлено автором)

Таким образом, представленные результаты анализа введенных групп признаков в частотно-временной области позволяют получить значения признаков, количественно отличающихся между определяемыми действиями человека. Установленная зависимость частотно-временной области признаков от выполняемого действия человека во время ТОиР позволяет использовать описанный способ обработки признаков для классификации действий.

2.3 Выводы по главе 2

Алгоритм идентификации производственных процессов представляет собой обработку видеопотока, которая заключается в анализе перемещения ключевых точек рук человека во время выполнения ТОиР, и расчет набора признаков, которые описывают изменение положение рук в кадре видеопотока. На основе обработки полученных признаков выполняется обучение модели классификации и проводится оценка качества классификации данных. Методология выполнения алгоритма идентификации на каждом этапе подтверждается теоретическими методами компьютерного зрения для обработки изображений, известными моделями машинного обучения для решения задачи классификации данных и методами анализа временных рядов.

Установлено, что методы идентификации действий человека на основе алгоритмов компьютерного зрения применимы в области технического обслуживания и ремонта оборудования промышленного оборудования при извлечении характерного набора признаков, основанных на движении рук человека.

Обоснование выбора временных и частотно-временных характеристик для набора признаков, представляющих временные ряды, выполнено на основе сравнения численных значений статистических параметров и сравнения функций вейвлет-преобразования для временных рядов, полученных в результате обработки видеопотока, содержащего действия по замене ПЛК в шкафу управления. Результаты сравнения статистических параметров показывают интенсивность изменения положения рук в кадре видеопотока, которая зависит от выполняемого действия по ТОиР. Результаты сравнения функций вейвлет-преобразования

показали, что значения по трем группам признаков группируются в зависимости от выполняемого действий по ТОиР, причем расчеты энтропии и энергии для коэффициентов вейвлет-преобразования показали количественное различие между разделяемыми классами, что подтверждает репрезентативность и зависимость параметров для обучения моделей классификации.

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ АЛГОРИТМА ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

3.1 Техническое обслуживание и ремонт центробежного насоса

Технологическим оборудованием, наиболее часто подверженное поломкам и возникновению неисправностей, и, соответственно, требующее своевременного выполнения технического обслуживания и ремонта, является насосное оборудование. На примере центробежного насоса Grundfos (CR1S-4 A-FGJ-AE-HQQE) были выполнены операции, необходимые для замены уплотнительной прокладки согласно инструкции по эксплуатации. На рисунке 3.1 представлены действия, которые были выполнены в ходе эксперимента и записаны на видеокамеру.



Рисунок 3.1 – Действия по ТОиР центробежного насоса, выполняемые во время лабораторного эксперимента (слева), центробежный насос в лаборатории (справа) (составлено автором)

Представленные выше действия выполнялись несколько раз разными людьми с использованием перчаток, а также без них, и были записаны на разные видеокамеры от первого и от третьего лица. На рисунке 3.2 представлено несколько

примеров выполнения обслуживания центробежного насоса, которые были проведены во время лабораторного эксперимента.



Рисунок 3.2 – Примеры видеозаписи действий во время эксперимента с центробежным насосом (фото автора)

На рисунке 3.3 показаны параметры видеозаписей, полученных в ходе эксперимента. Представлено распределение длительности выполнения действий по каждому классу с выделением квартилей и медианных значений.

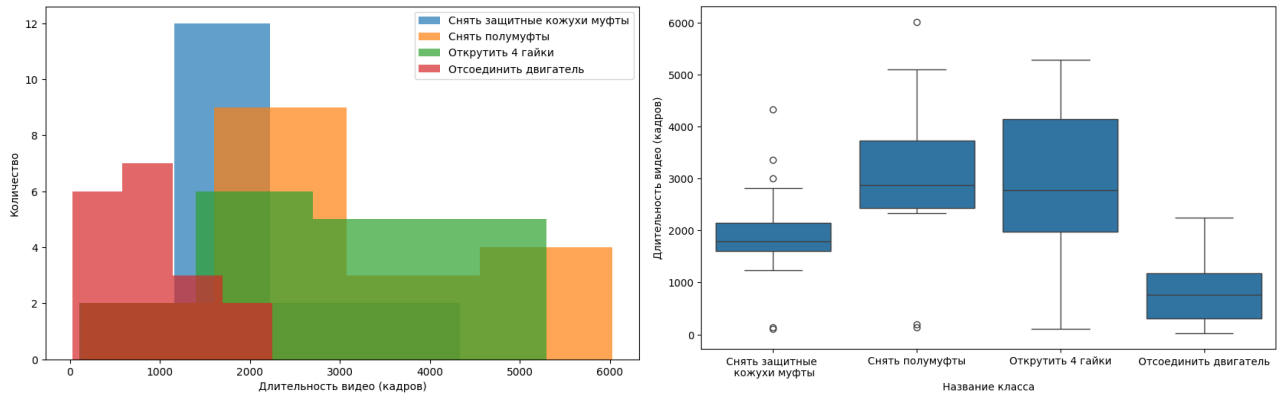


Рисунок 3.3 – Распределение длительности выполнения действий по ТОиР в эксперименте (слева) и внутри каждого класса (справа) (составлено автором)

На рисунке 3.4 представлены графики рассчитанных значений признаков расстояния. Подписи названий над графиком определяют принадлежность признака, где d – признак расстояния (от англ. distance), l – левая рука (от англ. left), r – правая рука (от англ. right), число обозначает номер пальца, для которого вычислялось значение признака. Соответственно, на графике d_l_1 отображены результаты вычисления расстояния между точками для первого пальца левой руки по всем сериям эксперимента, принадлежавшим к выполнению первого действия, а именно снятию защитных кожухов муфт.



Рисунок 3.4 – Значения признаков расстояния по каждому классу для всех записанных экспериментов (составлено автором)

Подобным образом были определены признаки углов, фрагмент которых представлен на рисунке 3.5. В соответствии со схемой признака (рисунок 2.6) подписи в названии графиков обозначают определенный угол, который образует рука. Например, название *tr_l_1_a* обозначает: *tr* – признак углов, *l* – левая рука, *1* – первый треугольник, *a* – угол треугольника. Таким образом, графики показывают изменение во времени углов в образованных рукой треугольниках в диапазоне от 0 до 180 градусов.

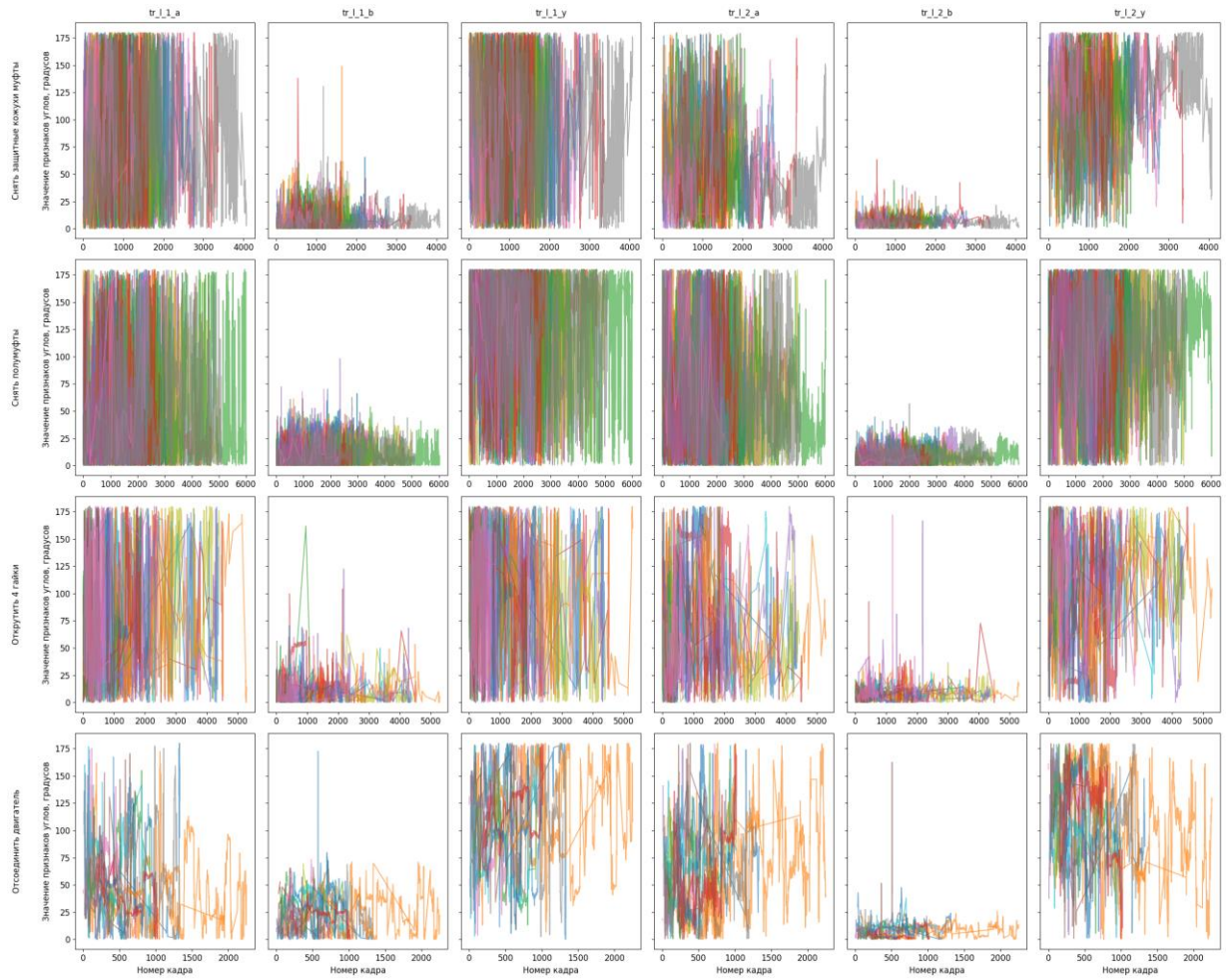


Рисунок 3.5 – Фрагмент значений признаков углов по каждому классу для всех записанных экспериментов (составлено автором)

На рисунке 3.6 представлены результаты расчета геометрических признаков, характеризующих площадь фигуры, которую образуют пальцы руки. Обозначение G_L показывает значения для левой руки, G_R – для правой руки.

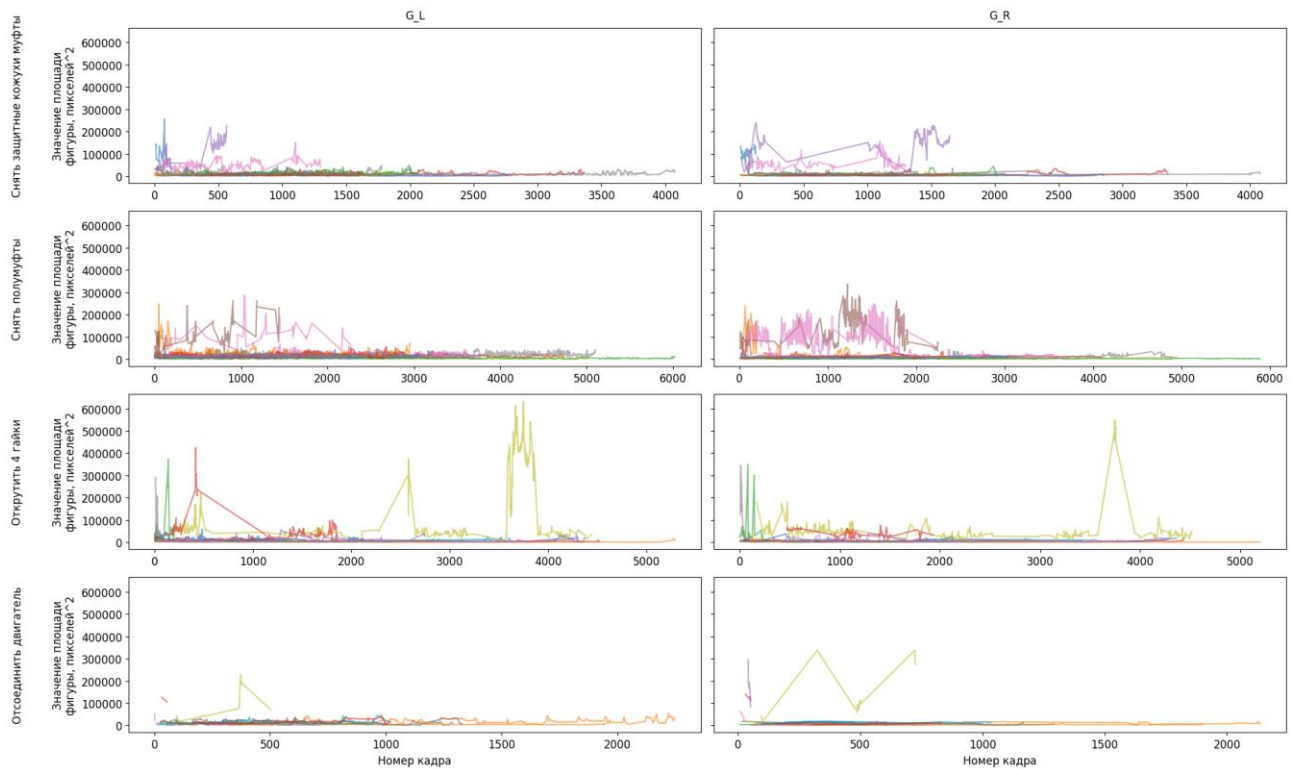


Рисунок 3.6 – Значения геометрических признаков по каждому классу для всех записанных экспериментов (составлено автором)

Полученные временные ряды, состоящие из значений признаков расстояния, признаков углов и геометрических признаков, описываются статистическими параметрами. Для этого для каждого эксперимента, то есть для каждого временного ряда вычисляется набор статистических параметров, которые в совокупности будут характеризовать временной ряд. На рисунке 3.7 представлена визуализация рассчитанных статистических параметров для признаков расстояния. Рисунок состоит из строк, каждая из которых обозначает номер видеозаписи эксперимента, по горизонтали обозначены названия статистических признаков. Обозначив на рисунке классы, то есть определяемые действия по обслуживанию, заметна разница в значениях признаков.

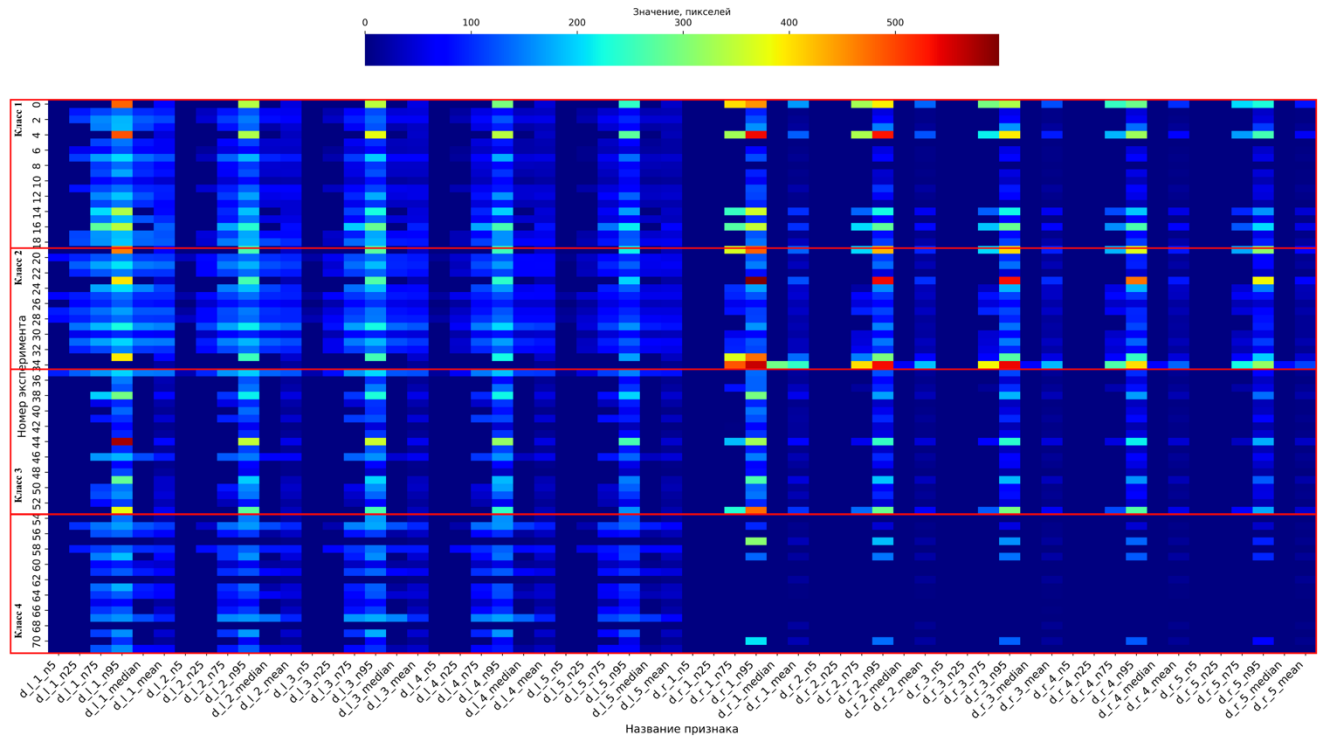


Рисунок 3.7 – Статистические значения для временных рядов признаков расстояния (составлено автором)

На рисунках 3.8 и 3.9 аналогичным образом представлены статистические значения для угловых и геометрических признаков.

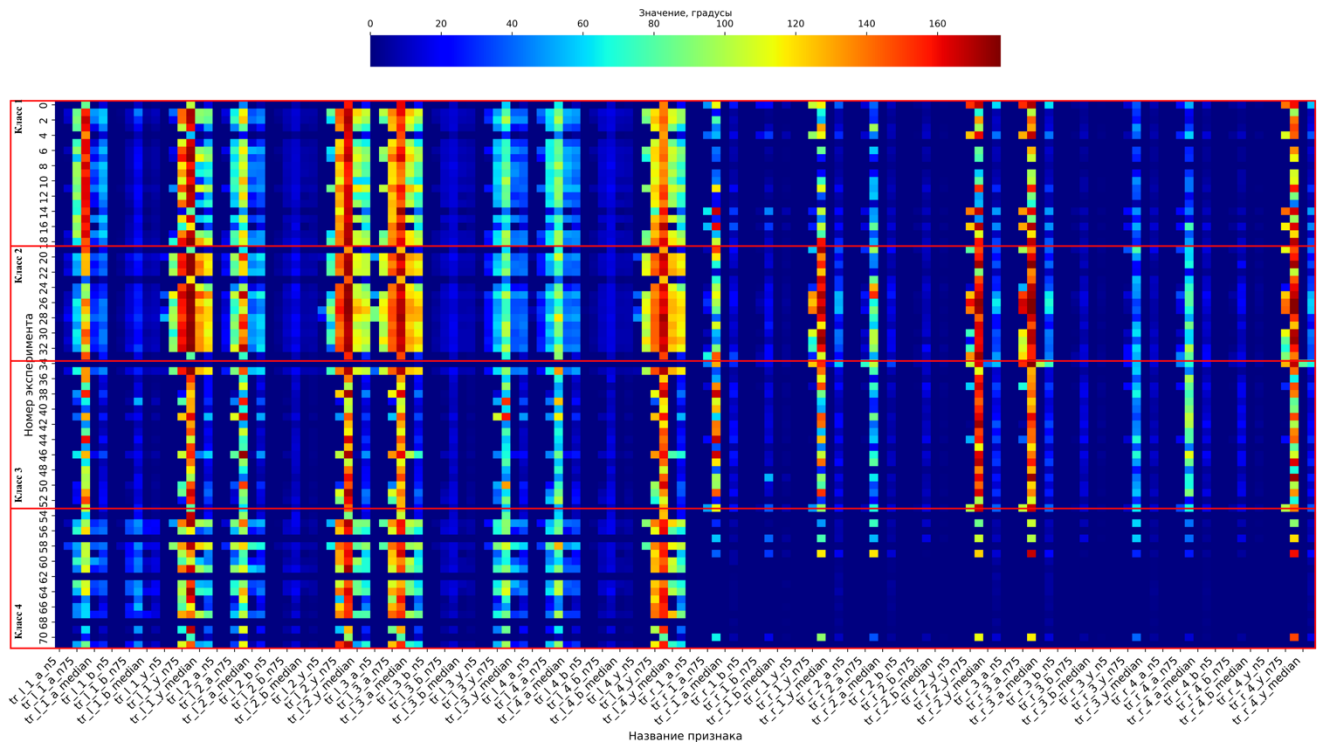


Рисунок 3.8 – Статистические значения для временных рядов признаков углов (составлено автором)

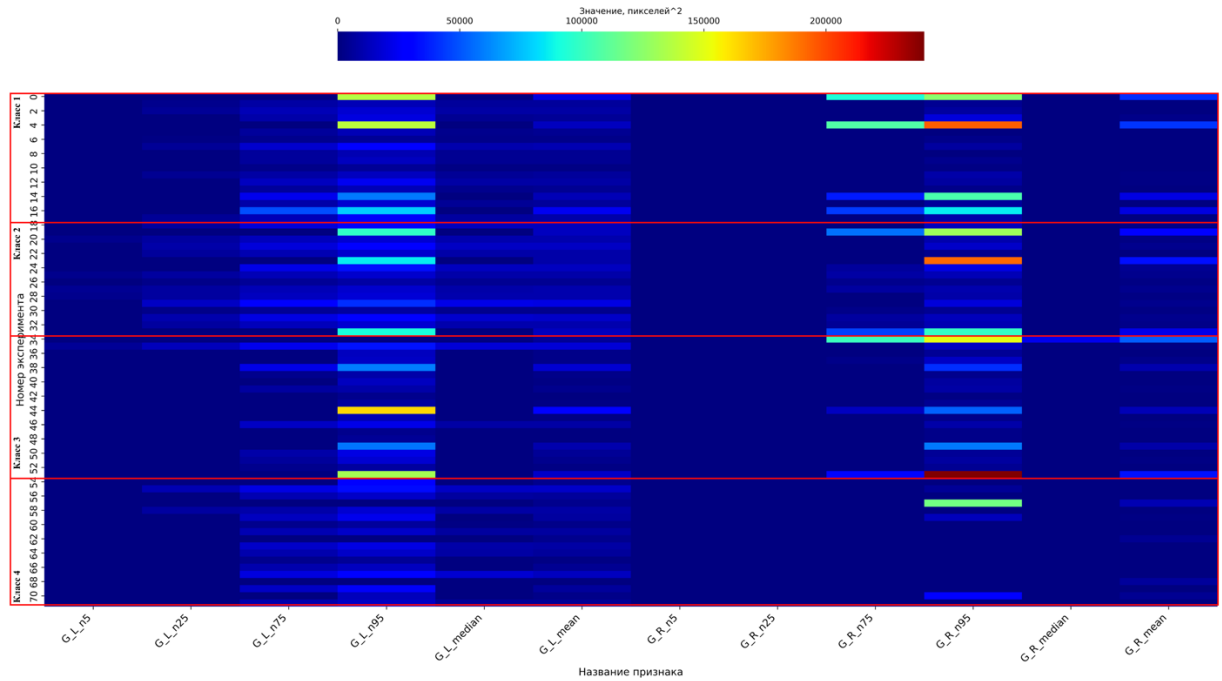


Рисунок 3.9 – Статистические значения для временных рядов геометрических признаков (составлено автором)

Экспериментальные данные были равномерно разделены на тренировочные и тестовые выборки для каждого класса. На рисунке 3.10 представлена столбчатая диаграмма, отражающая количество экспериментальных видеофайлов, соответствующих каждому классу.

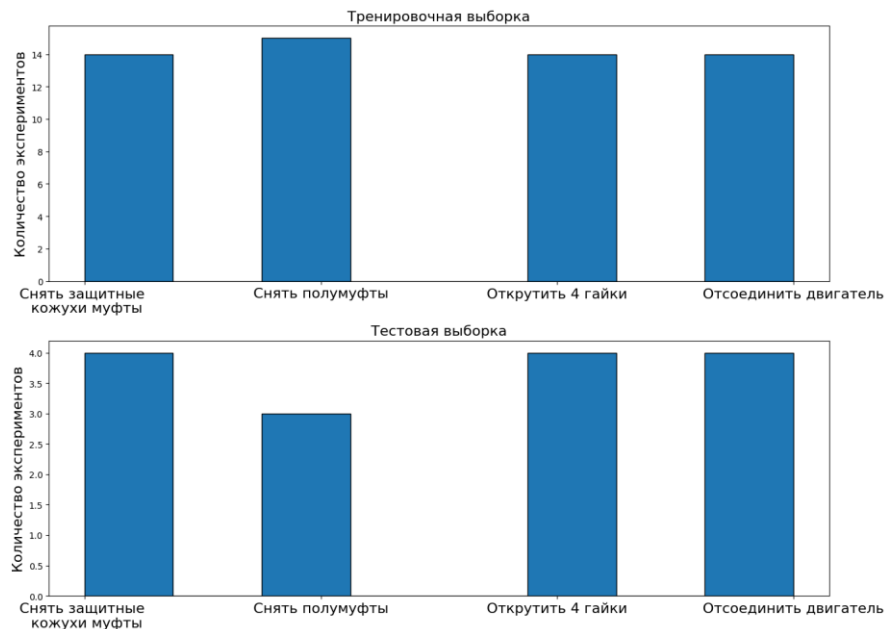


Рисунок 3.10 – Распределение количества видеофайлов на тренировочную и тестовую выборку для обучения модели машинного обучения (составлено автором)

На основе тренировочных и тестовых данных были обучены модели машинного обучения для классификации экспериментальных данных. В таблице 3.1 показаны результаты обучения моделей классификации. В данном эксперименте наилучший результат классификации на тестовой выборке данных получили модель логистической регрессии и классификатор многослойного перцептрона.

Таблица 3.1 – Результаты обучения моделей классификации (составлено автором)

Классификатор	Точность на тренировочной выборке	Точность на тестовой выборке
Логистическая регрессия	1,00	0,93
Многослойный перцептрон	1,00	0,93
Случайный лес	1,00	0,87
Метод опорных векторов	1,00	0,87
Градиентный бустинг	1,00	0,80
К Ближайших соседей	0,95	0,80
Дерево решений	1,00	0,73
Наивный Байес	0,95	0,60
AdaBoost	0,74	0,53
Гауссовский процесс	1,00	0,40

Точность классификации действий по каждому классу моделью логистической регрессии представлена на рисунке 3.11. Можно отметить, что точность классификации в 93% в данной модели показывает, что модель верно классифицирует действия, за исключением одного эксперимента, где был ошибочно определен первый класс в тестовом наборе данных.

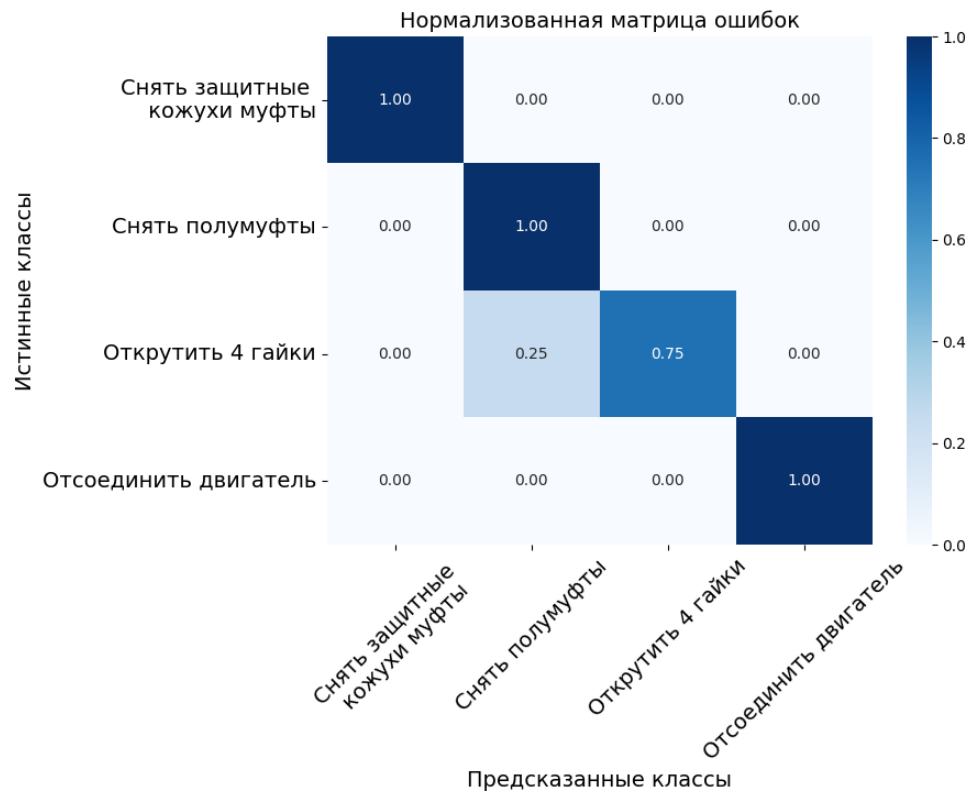


Рисунок 3.11 – Матрица ошибок (составлено автором)

В таблице 3.2 представлены расчеты метрик качества классификации для модели логистической регрессии.

Таблица 3.2 – Оценка метрик качества классификации (составлено автором)

	Precision	Recall	F1-мера
Класс «Снять защитные кожухи муфты»	1,00	1,00	1,00
Класс «Снять полумуфты»	0,75	1,00	0,86
Класс «Открутить 4 гайки»	1,00	0,75	0,86
Класс «Отсоединить двигатель»	1,00	1,00	1,00
Accuracy	0,93		
F1-мера	0,93		
ROC AUC	0,99		

Далее приведено сравнение результатов классификации при различном выборе набора признаков (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Сравнение точности классификации действий по ТОиР центробежного насоса при использовании разных наборов признаков (составлено автором)

Набор признаков	Метрика точности классификации		
	Accuracy	F1-мера	ROC AUC
Признаки расстояния	0,56	0,51	0,72
Признаки углов	0,59	0,56	0,77
Геометрические признаки	0,51	0,41	0,63
Временная область признаков	0,93	0,93	0,98
Частотно-временная область признаков	0,73	0,73	0,95
Временная и частотно-временная область признаков	0,93	0,93	0,99

3.2 Техническое обслуживание и ремонт распределительного электрического щита

Второе экспериментальное исследование предложенного алгоритма проводилось на примере технического обслуживания распределительного электрического щита. На рисунке 3.12 представлен внешний вид электрического щита и действия, которые необходимо идентифицировать во время работы с ним. В ходе эксперимента необходимо было обесточить распределительный электрический щит и затем выполнить действия для демонтажа устройства из щита. Для этого необходимо было отключить все подключенные кабели к устройству и затем демонтировать его с DIN-рейки. После демонтажа выполнялись действия по монтажу этого же устройства в щит путем выполнения тех же действий, но в обратной последовательности.

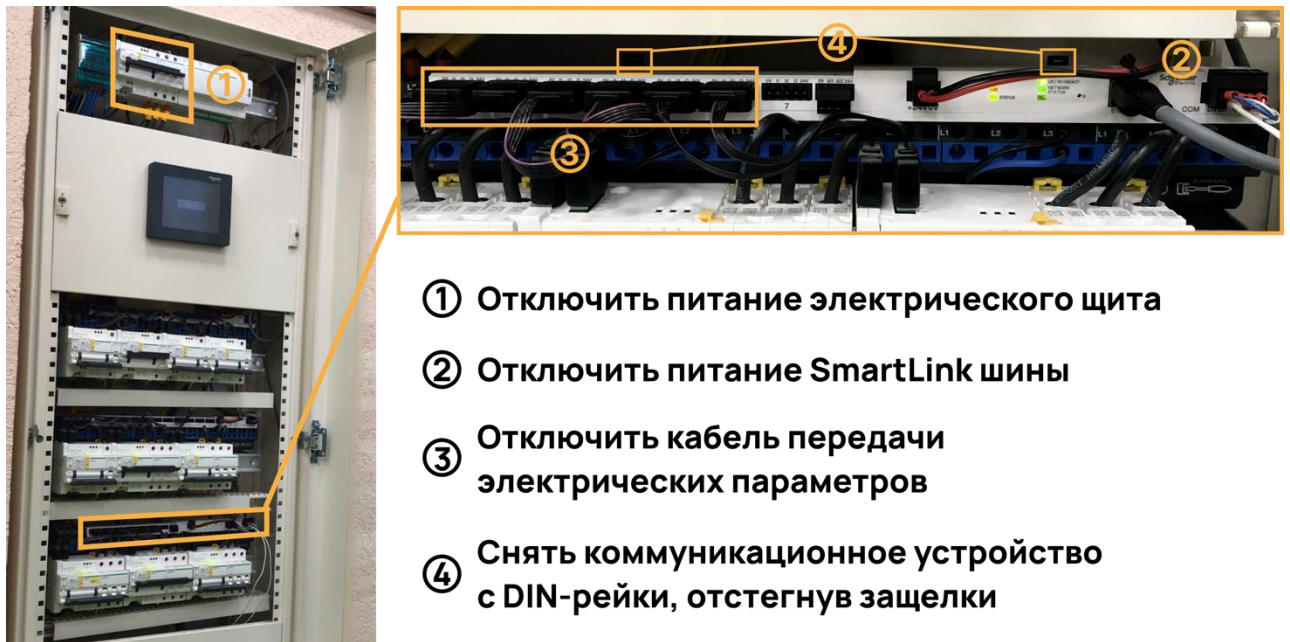


Рисунок 3.12 – Распределительный электрический щит и действия необходимые для замены устройства SmartLink в распределительном электрическом щите (составлено автором)

На рисунке 3.13 показаны несколько примеров действий, выполняемых во время эксперимента.



Рисунок 3.13 – Пример выполнения замены устройства SmartLink в ходе лабораторного эксперимента (составлено автором)

На рисунке 3.14 представлены результаты видеозаписи проведенных экспериментов. Показана гистограмма распределения длительности выполнения

каждого определяемого действия, а также график свечей, дающий понимание по распределению продолжительности времени внутри каждого класса.

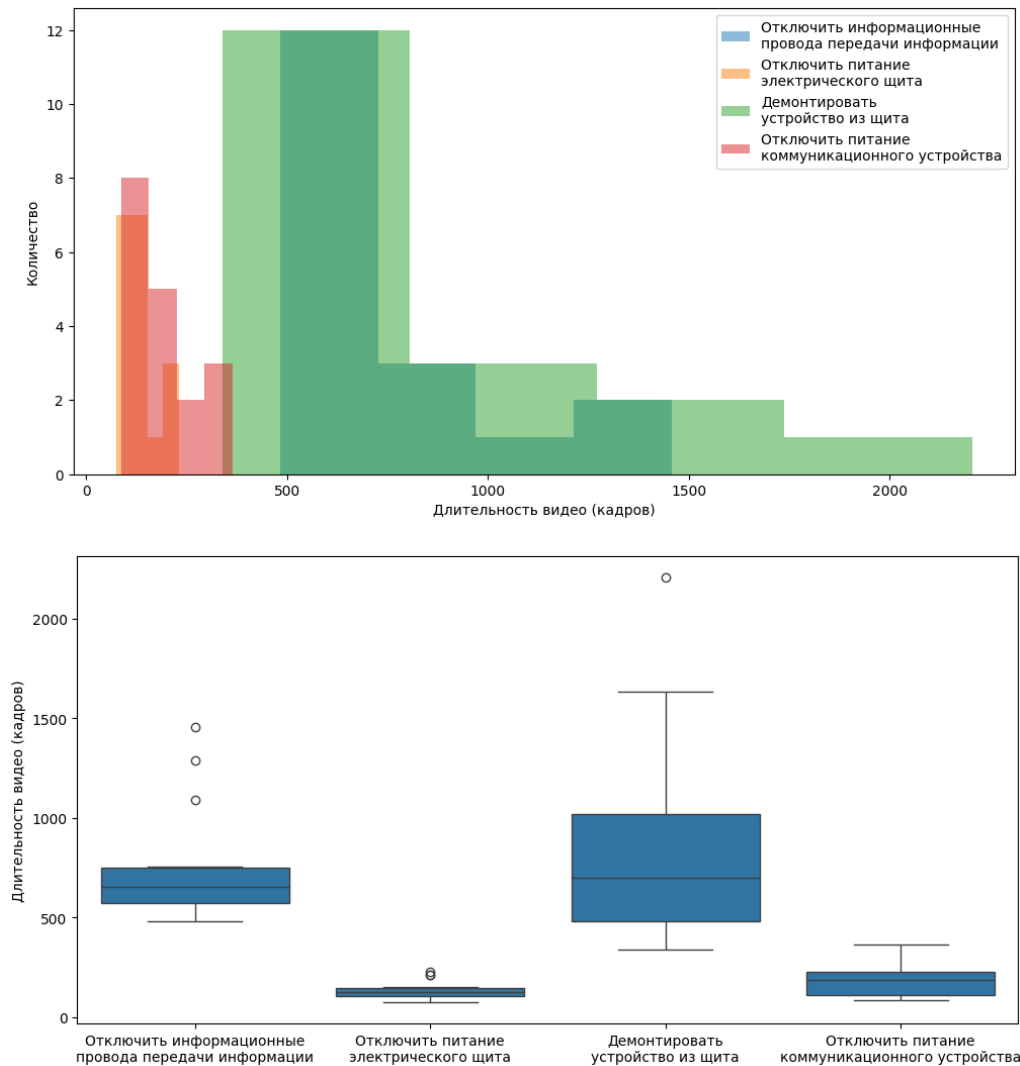


Рисунок 3.14 – Распределение продолжительности выполнения каждого действия в эксперименте (составлено автором)

Эксперименты были поровну разделены на тренировочную и тестовую выборки для обучения модели классификации. Разделение данных в равной степени представлено на рисунке 3.15.

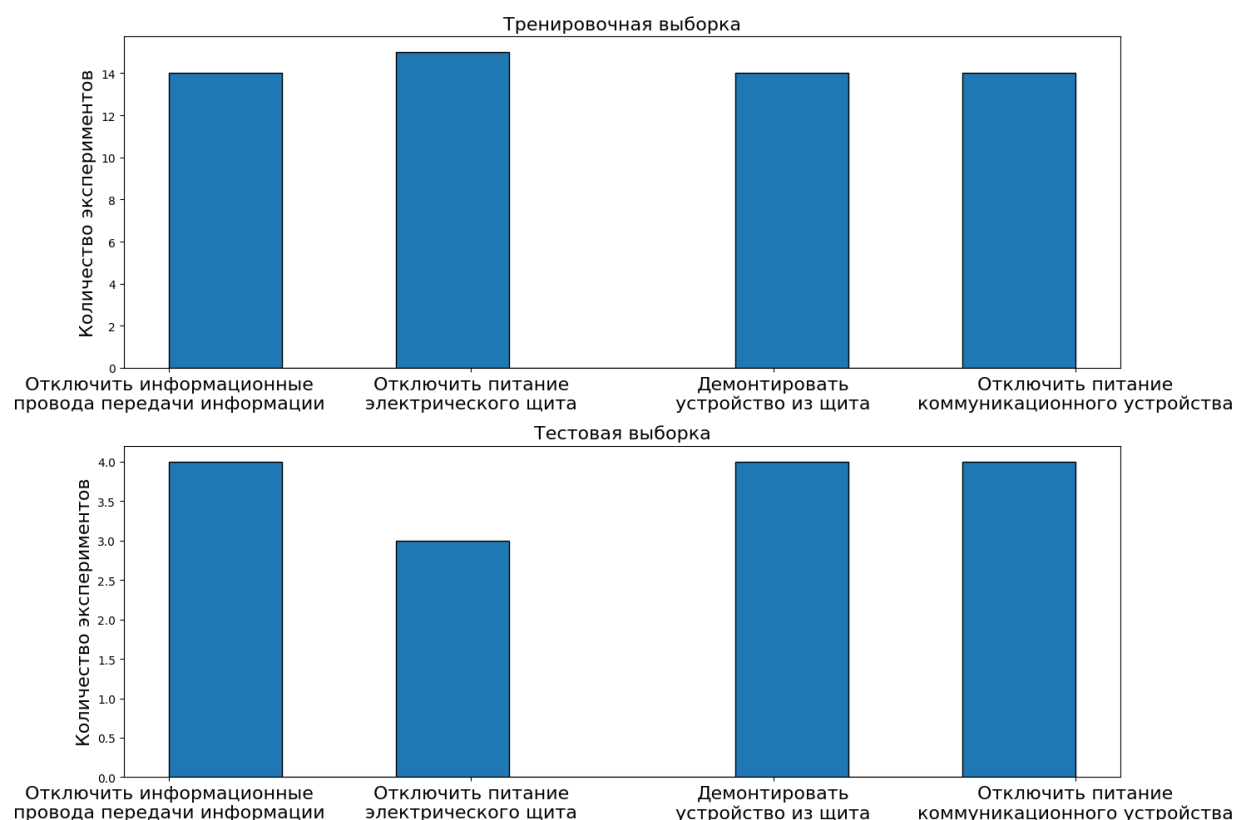


Рисунок 3.15 – Распределение записанных видеофайлов на тренировочную и тестовую выборки для обучения модели классификации (составлено автором)

Результаты обучения моделей классификации и значения точности обучения представлены в таблице 3.4. В данном эксперименте модель градиентного бустинга показала наилучший результат классификации с точность в 87 % на тестовой выборке.

Таблица 3.4 – Результаты обучения моделей классификации (составлено автором)

Классификатор	Точность на тренировочной выборке	Точность на тестовой выборке
Градиентный бустинг	1,00	0,87
Случайный лес	1,00	0,80
Логистическая регрессия	1,00	0,80
Многослойный перцептрон	1,00	0,80
Дерево решений	1,00	0,73
Метод опорных векторов	0,96	0,73
Наивный Байес	0,88	0,73
К Ближайших соседей	0,75	0,60
AdaBoost	0,74	0,60
Гауссовский процесс	1,00	0,47

На рисунке 3.16 представлена матрица несоответствий, где показана нормализованная точность классификации по каждому классу.

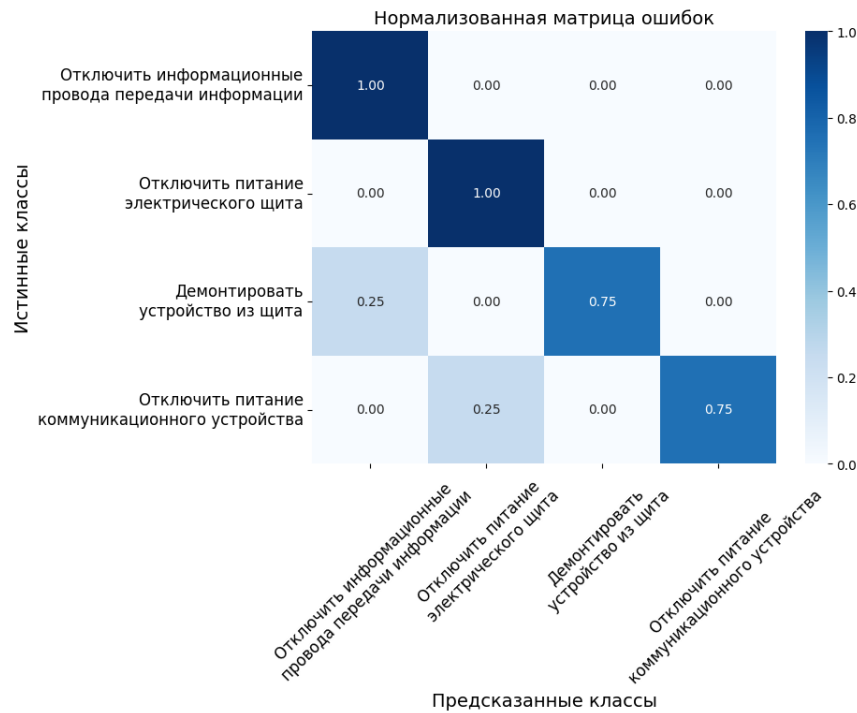


Рисунок 3.16 – Матрица ошибок (составлено автором)

Далее на рисунке 3.17 показана точность классификации обученных моделей по метрике ROC AUC. Результат расчета метрики показывает точность наилучшего классификатора в 94 %.

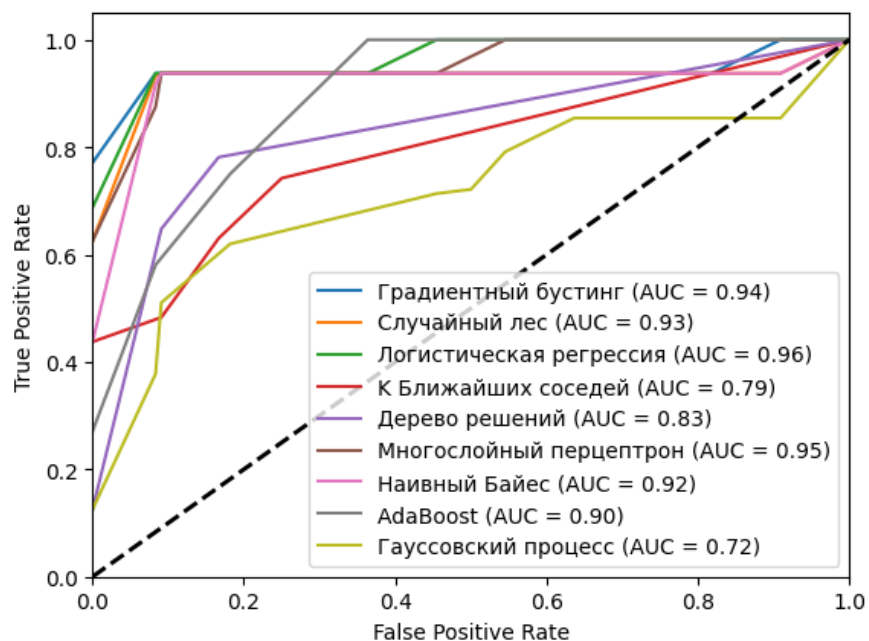


Рисунок 3.17 – Оценка точности классификации обученных моделей по кривой ROC AUC (составлено автором)

В таблице 3.5 представлены расчеты метрик качества для модели градиентного бустинга.

Таблица 3.5 – Оценка метрик качества классификации (составлено автором)

	Precision	Recall	F1-мера
Класс «Отключить информационные провода передачи информации»	0,80	1,00	0,89
Класс «Отключить питание электрического щита»	0,75	1,00	0,86
Класс «Демонтировать устройство из щита»	1,00	0,75	0,86
Класс «Отключить питание коммуникационного устройства»	1,00	0,75	0,86
Accuracy	0,87		
F1-мера	0,87		
ROC AUC	0,94		

Далее приведено сравнение результатов классификации при различном выборе набора признаков (таблица 3.6).

Таблица 3.6 – Сравнение точности классификации действий по ТОиР распределительного электрического щита при использовании разных наборов признаков (составлено автором)

Набор признаков	Метрика точности классификации		
	Accuracy	F1-мера	ROC AUC
Признаки расстояния	0,70	0,67	0,81
Признаки углов	0,72	0,68	0,81
Геометрические признаки	0,67	0,62	0,76
Временная область признаков	0,60	0,52	0,90
Частотно-временная область признаков	0,73	0,73	0,86
Временная и частотно-временная область признаков	0,87	0,87	0,94

3.3 Применение алгоритма идентификации производственных процессов на открытом наборе данных

Помимо лабораторных экспериментов, была выполнена проверка предложенного алгоритма идентификации на примере набора данных, рассматриваемого в [156]. Набор данных представляет собой видеофайлы мытья рук, задача которого в предложенной научной статье являлось найти способ распознавания каждого шага человека во время того, как человек моет руки. Подобная задача была особо актуальна в 2020-2021 годах ввиду пристального внимания к санитарным условиям и подобные системы контроля имели особенный спрос.

В представленной работе выбор данного набора данных для исследования объясняется схожими простыми, но в тоже время подобными действиями, которые во время технического обслуживания и ремонта оборудования также визуальны могут быть похожи. В этой связи данный набор видеофайлов также был обработан предложенным алгоритмом. На рисунке 3.18 показаны действия, которые предлагается распознать в наборе данных, которые представляют собой 12 шагов, которые совершает человек во время мытья рук.

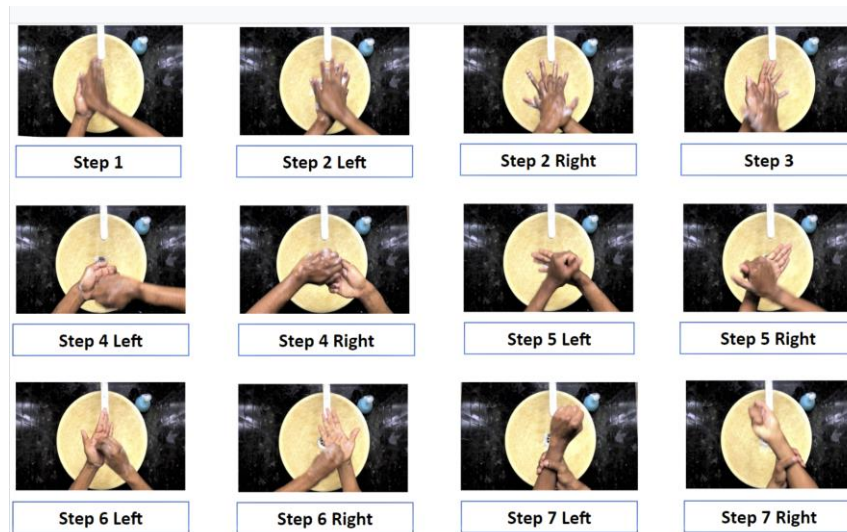


Рисунок 3.18 – Определяемые действия в наборе данных [156]

Набор данных состоит из 25 видеофайлов на каждый определяемый класс, которые были разделены на тренировочную и тестовую выборки (рисунок 3.19).

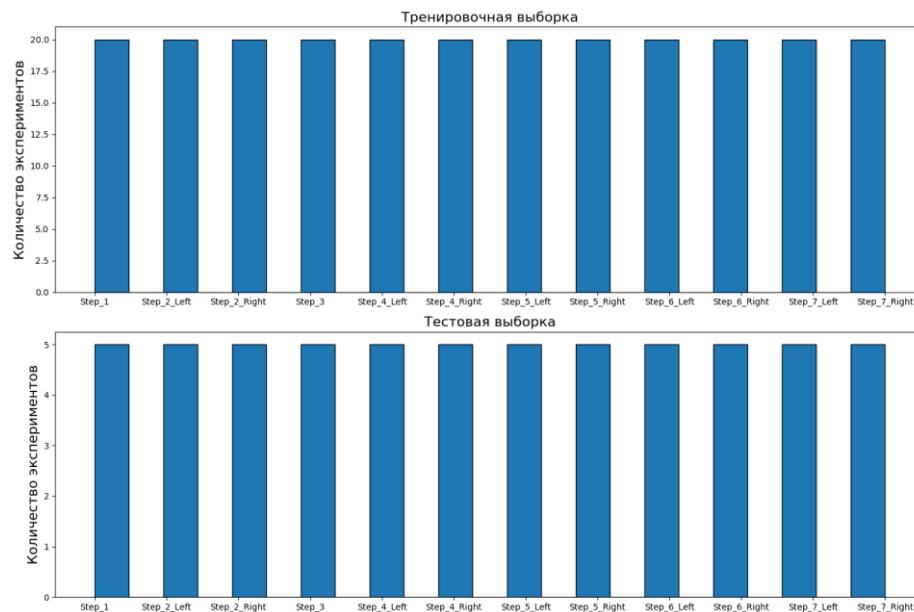


Рисунок 3.19 – Распределение набора данных на тренировочную и тестовую выборку (составлено автором)

Длительность по каждому классу для представленного набора данных показана на рисунке 3.20.

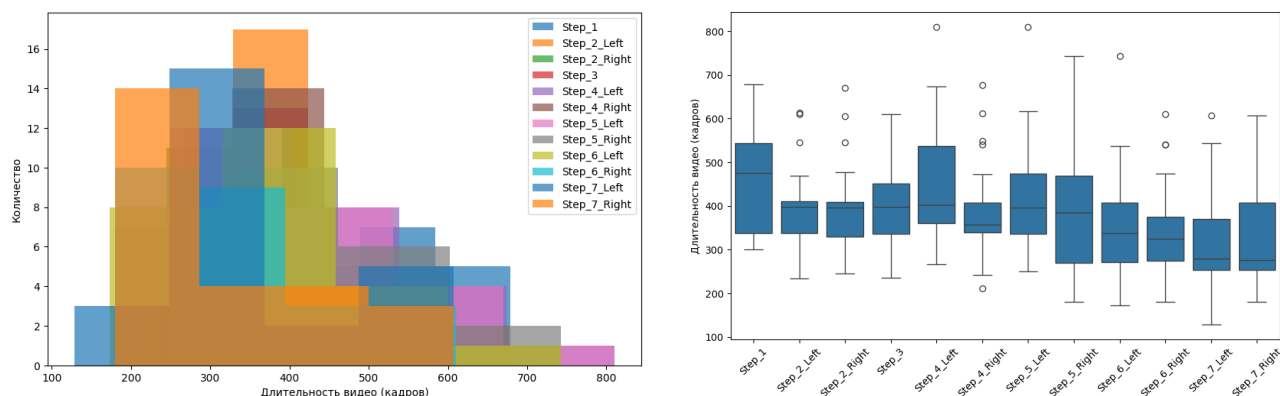


Рисунок 3.20 – Распределение длительности выполнения действия в эксперименте (слева) и внутри каждого класса (справа) (составлено автором)

Результаты обучения моделей классификации показаны в таблице 3.7. Наилучший результат классификации наблюдается у модели случайного леса с точностью 88 % на тестовой выборке данных.

Таблица 3.7 – Результат обучения моделей классификации (составлено автором)

Классификатор	Точность на тренировочной выборке	Точность на тестовой выборке
Случайный лес	1,00	0,88
Логистическая регрессия	1,00	0,85
Многослойный перцептрон	1,00	0,85
Метод опорных векторов	0,97	0,83
Градиентный бустинг	1,00	0,73
Дерево решений	1,00	0,70
К Ближайших соседей	0,86	0,67
Гауссовский процесс	1,00	0,63
Наивный Байес	0,69	0,52
AdaBoost	0,19	0,13

Матрица ошибок для модели случайного леса показана на рисунке 3.21. Она показывает точность классификации каждого класса в наборе данных.

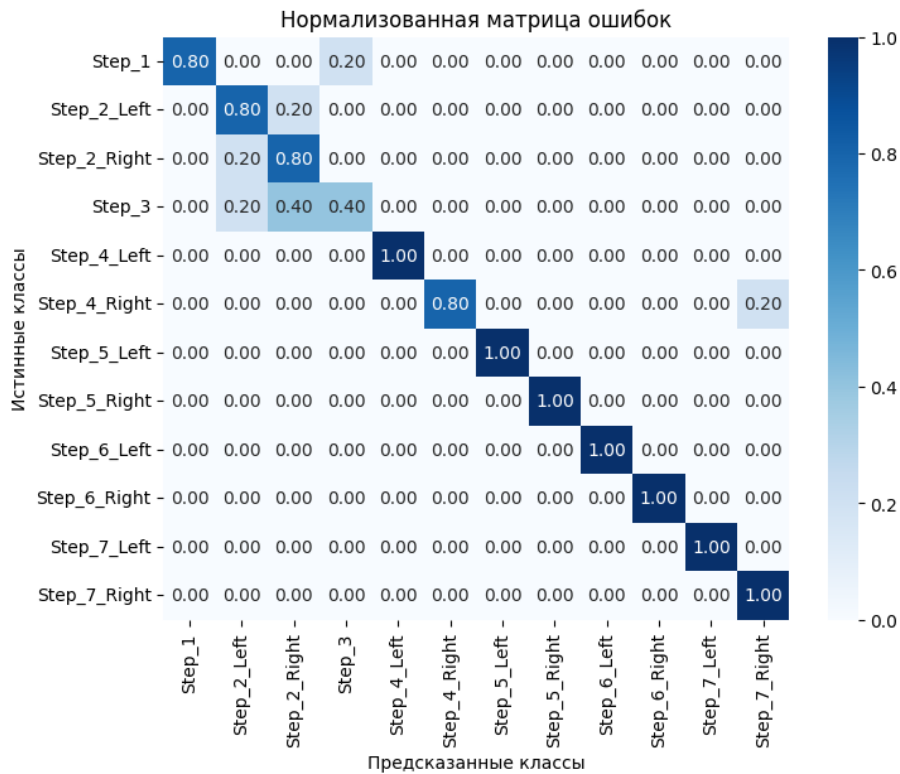


Рисунок 3.21 – Матрица ошибок (составлено автором)

На рисунке 3.22 построены кривые для метрики ROC AUC по всем обученным моделям. По оценке данной метрики наибольший результат достигается по модели случайного леса, покрывая 99 % площади под кривой.

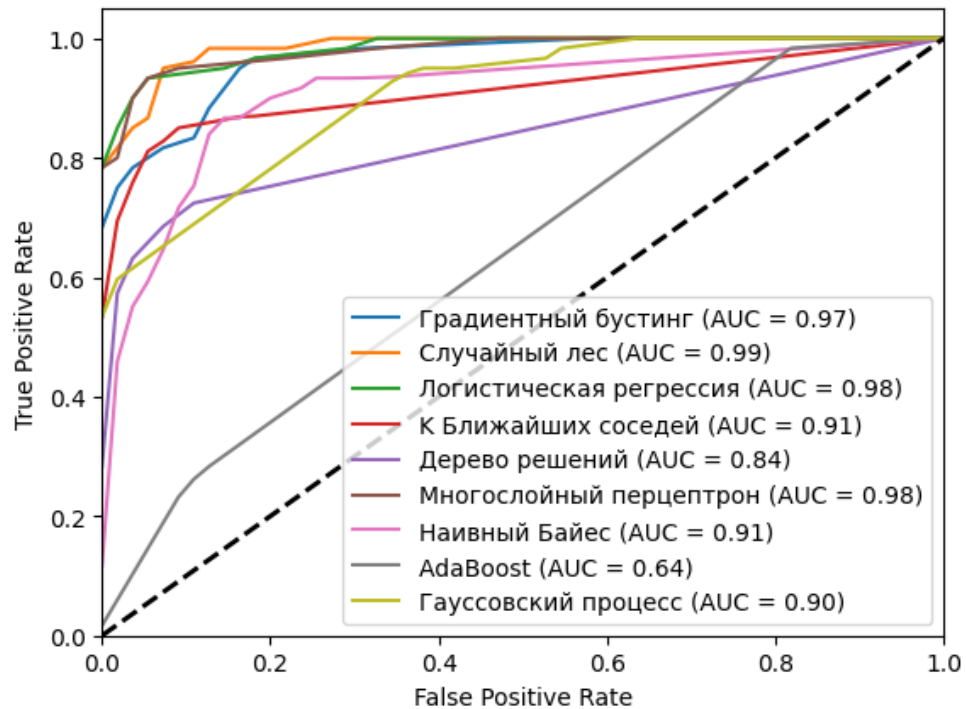


Рисунок 3.22 – Оценка точности классификации обученных моделей по кривой ROC AUC (составлено автором)

В таблице 3.8 представлены результаты расчета метрик качества классификации для модели случайного леса.

Таблица 3.8 – Оценка метрик качества классификации (составлено автором)

	Precision	Recall	F1-мера
Класс 0	1,00	0,60	0,75
Класс 1	0,71	1,00	0,83
Класс 2	0,67	0,80	0,73
Класс 3	0,50	0,40	0,44
Класс 4	1,00	1,00	1,00
Класс 5	1,00	0,80	0,89
Класс 6	1,00	1,00	1,00
Класс 7	1,00	1,00	1,00
Класс 8	1,00	1,00	1,00
Класс 9	1,00	1,00	1,00
Класс 10	1,00	1,00	1,00
Класс 11	0,83	1,00	0,91
Accuracy	0,88		
F1-мера	0,88		
ROC AUC	0,99		

Далее приведено сравнение результатов классификации при различном выборе набора признаков (таблица 3.9).

Таблица 3.9 – Сравнение точности классификации действий из открытого набора данных при использовании разных наборов признаков (составлено автором)

Набор признаков	Метрика точности классификации		
	Accuracy	F1-мера	ROC AUC
Признаки расстояния	0,64	0,64	0,94
Признаки углов	0,74	0,75	0,97
Геометрические признаки	0,26	0,26	0,71
Временная область признаков	0,85	0,85	0,98
Частотно-временная область признаков	0,68	0,66	0,97
Временная и частотно-временная область признаков	0,88	0,88	0,99

3.4 Промышленное испытание алгоритма идентификации производственных процессов на производственной линии сборки устройств защиты от импульсных перенапряжений

Предприятие АО «Хакель» – российская электротехническая компания, которая занимается производством устройств защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП). Технология производства подобных устройств выполняется рабочими вручную и заключается в простых повторяемых действиях. Технология сборки УЗИП заключается в подготовке поверхности устройств к

нанесению маркировки, установке устройств в матрицу принтера для нанесения маркировки и затем соединении деталей устройства в одну общую конструкцию. Экспериментальное исследование алгоритма идентификации на производстве заключалось в видеозаписи работы сотрудника, выполняющего подготовку устройств к сборке и непосредственно сборку устройств на рабочем месте. На рисунке 3.23 представлены действия, которые необходимо было идентифицировать во время работы сотрудника на рабочем месте сборки УЗИП.



Рисунок 3.23 – Действия по сборке устройств защиты от импульсных перенапряжений (составлено автором)

Перед сборкой устройств необходимо нанести маркировку на поверхность детали, что выполняется путем установки деталей в матрицу принтера. Описанные действия сотрудника также необходимо было идентифицировать (рисунок 3.24).



Вставка детали в матрицу принтера

Рисунок 3.24 – Пример действия «Вставка деталей в матрицу принтера» для нанесения маркировки на устройство (составлено автором)

На рисунке 3.25 представлено распределение времени выполнения для каждого класса во время видеозаписи работы сотрудника на производстве.

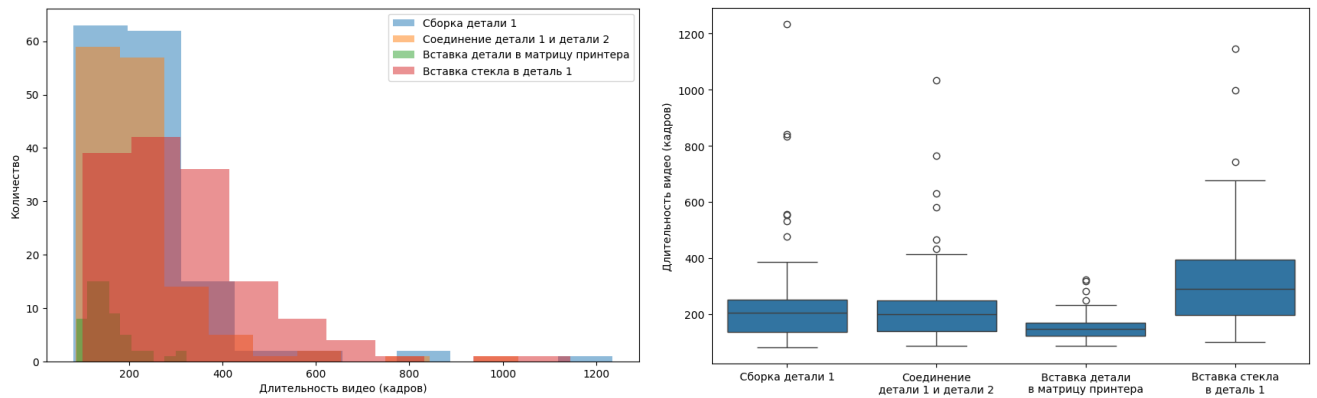


Рисунок 3.25 – Распределение длительности выполнения действия в эксперименте (слева) и внутри каждого класса (справа) (составлено автором)

Распределение значений признаков расстояния для экспериментальных данных представлено на рисунке 3.26.

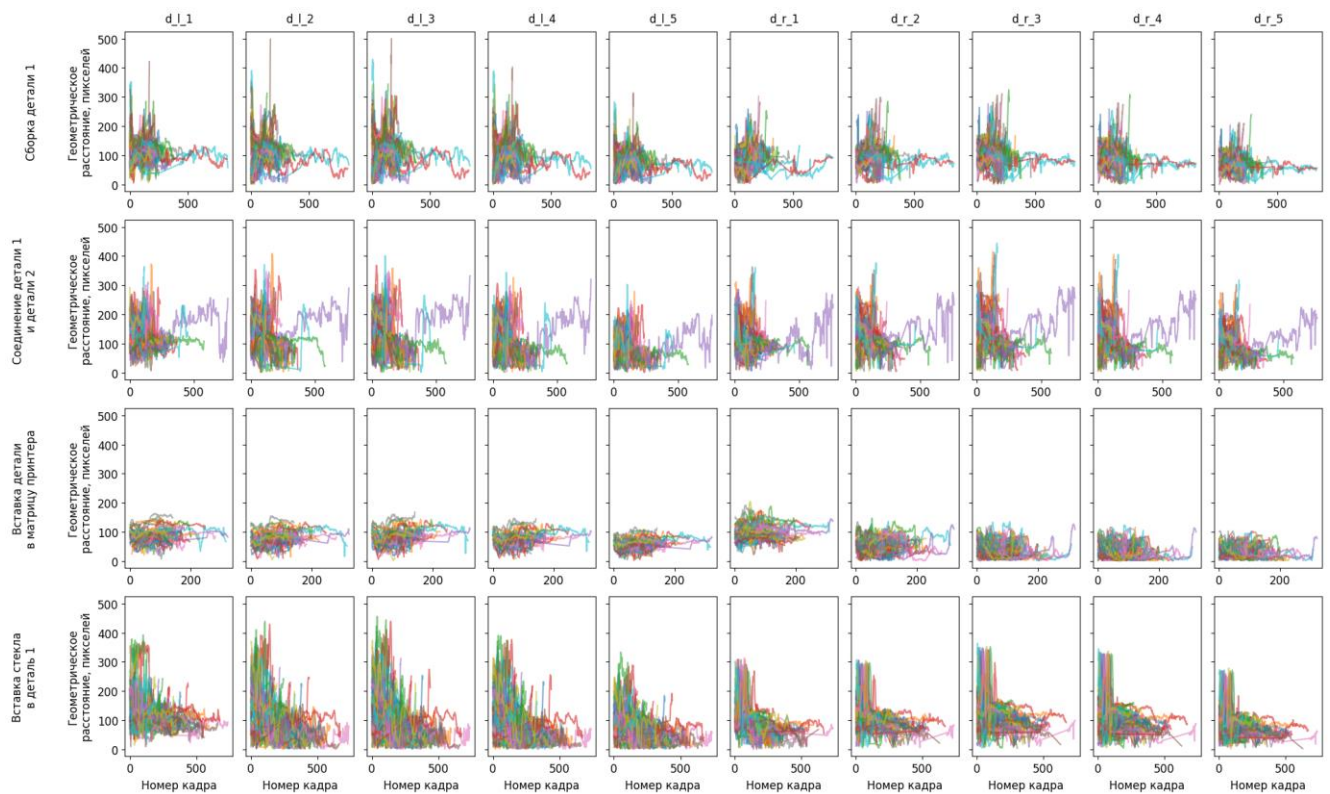


Рисунок 3.26 – Значения признаков расстояния по каждому классу для всех записанных экспериментов (составлено автором)

Распределение значений признаков углов для экспериментальных данных представлено на рисунке 3.27. Отображен фрагмент первых шести признаков для левой руки.

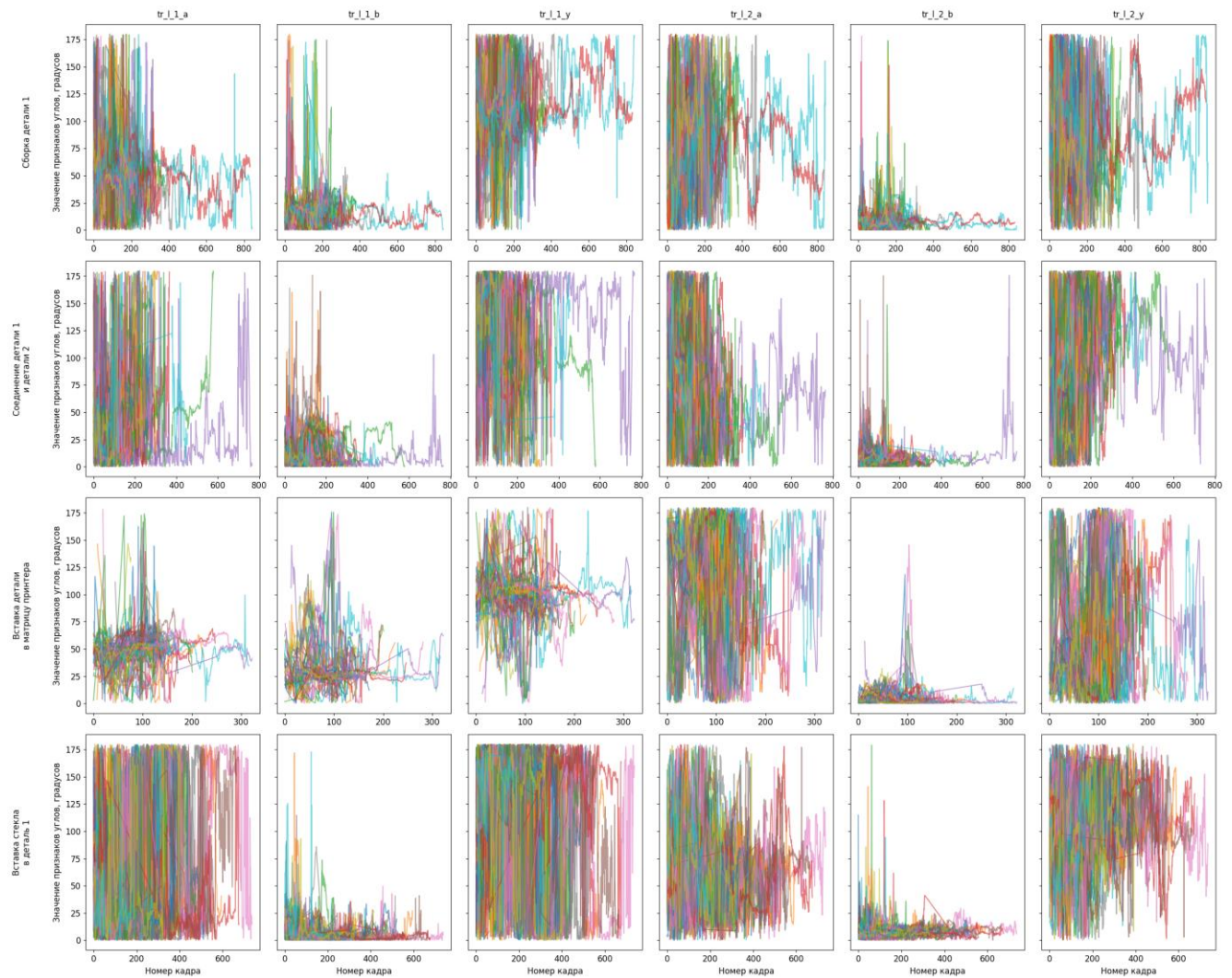


Рисунок 3.27 – Фрагмент значений признаков углов по каждому классу для всех записанных экспериментов (составлено автором)

Распределение значений геометрических признаков для экспериментальных данных представлено на рисунке 3.28.

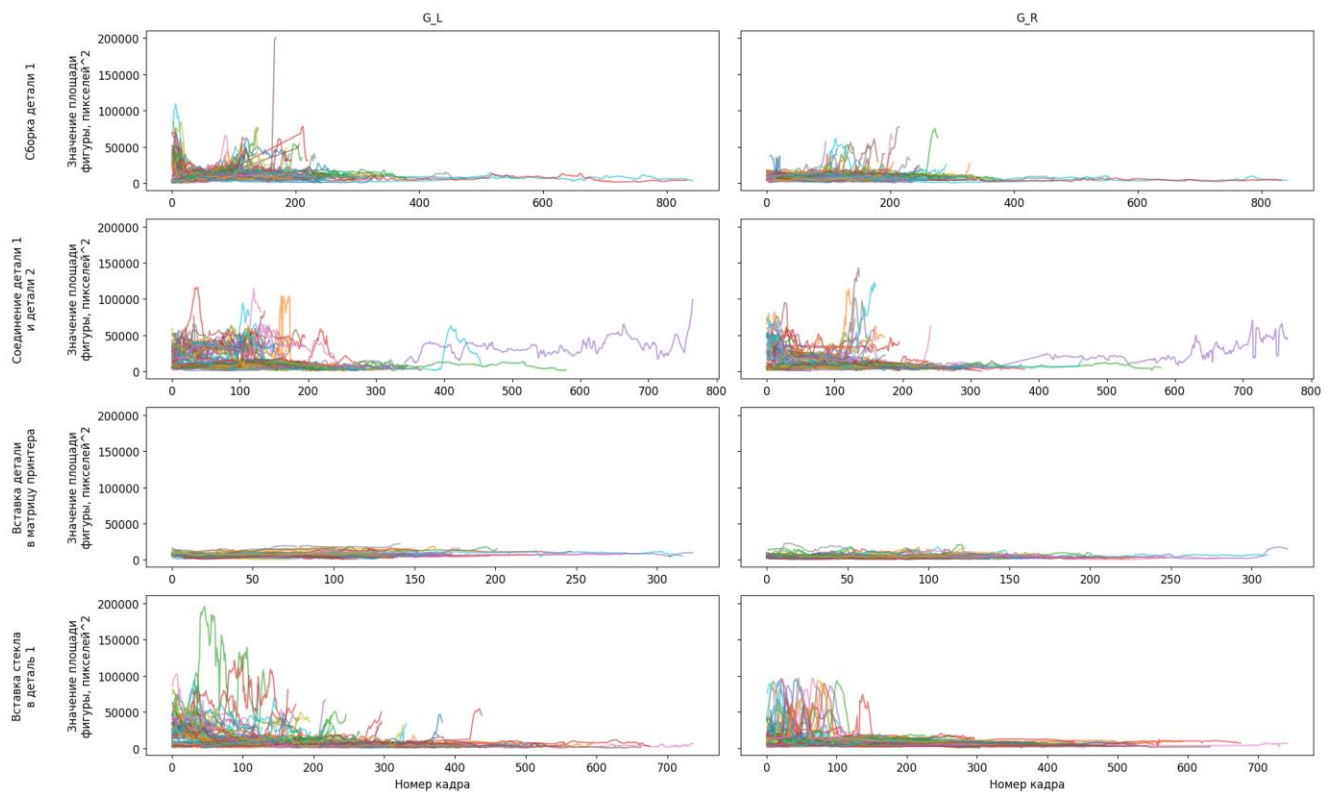


Рисунок 3.28 – Значения геометрических признаков по каждому классу для всех записанных экспериментов (составлено автором)

Распределение экспериментальных данных на тестовую и тренировочную выборку представлено на рисунке 3.29. Для обучения модели классификации с производственного процесса было собрано более 100 видеозаписей на каждое действие по сборке УЗИП и около 60 видеозаписей для действия вставки детали в матрицу принтера.

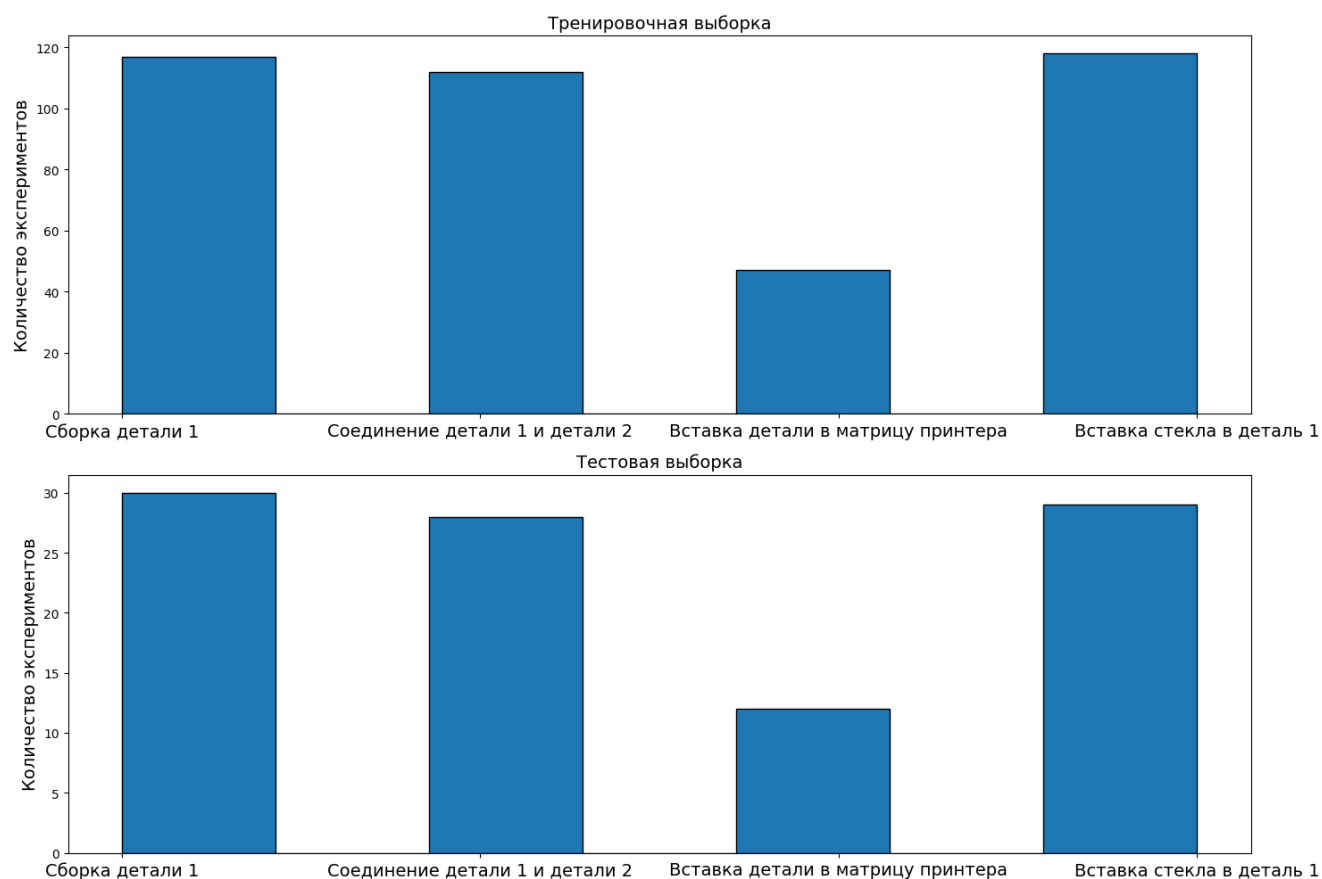


Рисунок 3.29 – Распределение набора данных на тренировочную и тестовую выборку (составлено автором)

В результате обучения моделей классификации наилучший результат на тестовой выборке в размере 98 % получила модель случайного леса и многослойный перцептрон (таблица 3.10).

Таблица 3.10 – Результат обучения моделей классификации (составлено автором)

Классификатор	Точность на тренировочной выборке	Точность на тестовой выборке
Случайный лес	1,00	0,98
Многослойный перцептрон	1,00	0,98
Градиентный бустинг	1,00	0,97
Логистическая регрессия	1,00	0,96
Метод опорных векторов	0,99	0,95
Наивный Байес	0,84	0,91
К Ближайших соседей	0,95	0,89
Дерево решений	1,00	0,86
Гауссовский процесс	1,00	0,77
AdaBoost	0,63	0,63

Матрица несоответствий (рисунок 3.30) показывает точность классификации действий на каждый класс для обученной модели случайного леса.

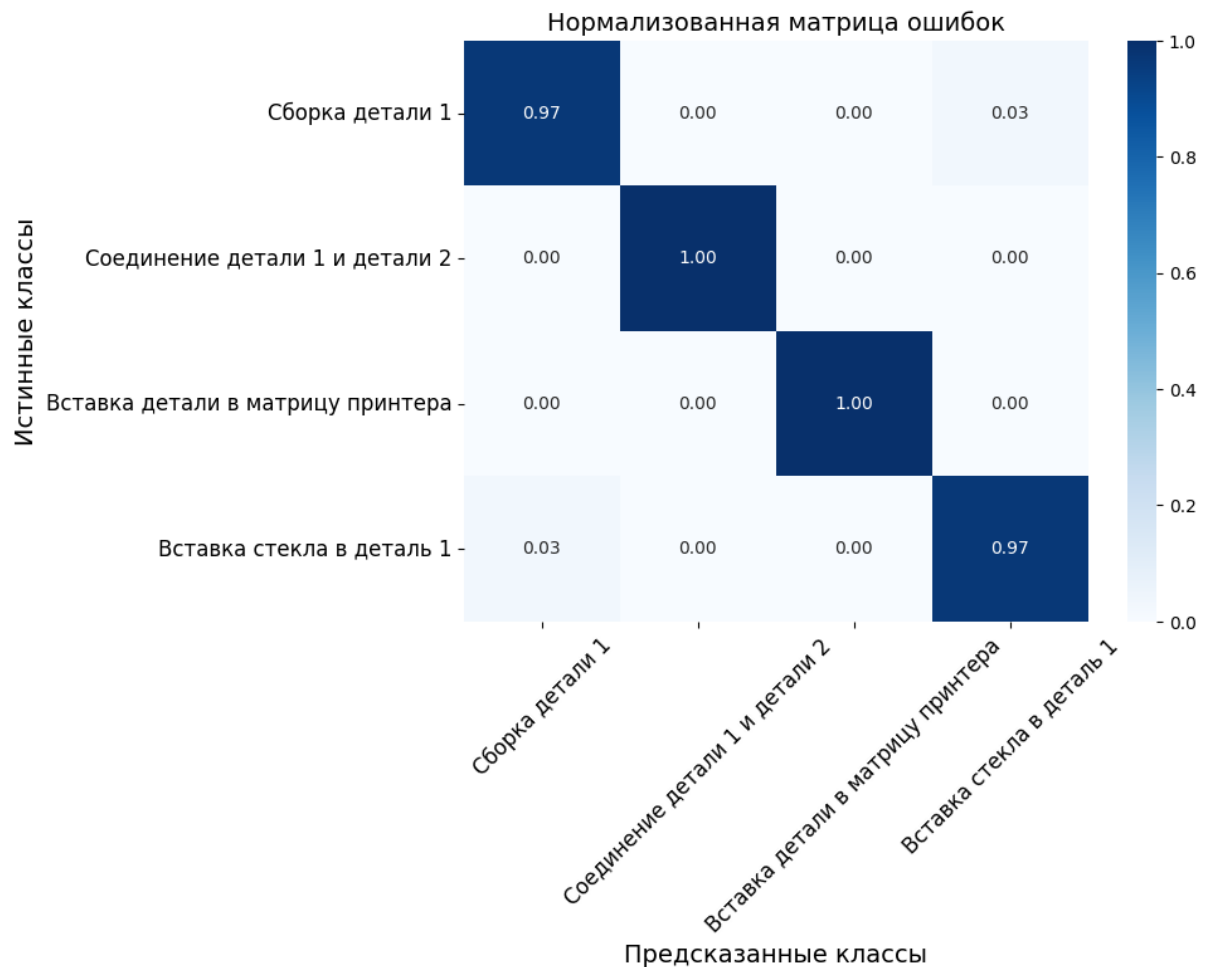


Рисунок 3.30 – Матрица ошибок (составлено автором)

Для всех обученных моделей была рассчитана метрика точности классификации ROC AUC. На рисунке 3.31 показан график точности классификации. По данной метрике точность трех моделей классификации, а именно градиентного бустинга, случайного леса и логистической регрессии составила 100%.

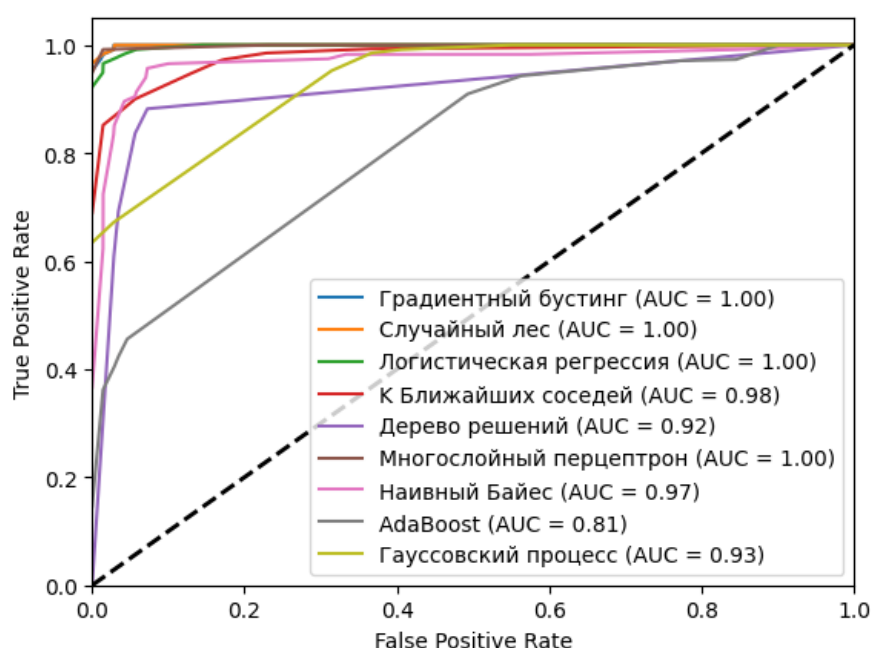


Рисунок 3.31 – Оценка точности классификации обученных моделей по кривой ROC AUC (составлено автором)

В таблице 3.11 представлены результаты расчета трех метрик качества для модели случайного леса.

Таблица 3.11 – Оценка метрик качества классификации (составлено автором)

	Precision	Recall	F1-мера
Класс «Сборка детали 1»	1,00	0,93	0,97
Класс «Соединение детали 1 и детали 2»	0,97	1,00	0,98
Класс «Вставка детали в матрицу принтера»	1,00	1,00	1,00
Класс «Вставка стекла в деталь 1»	0,97	1,00	0,98
Accuracy	0,98		
F1-мера	0,98		
ROC AUC	1,00		

Далее приведено сравнение результатов классификации при различном выборе набора признаков (таблица 3.12).

Таблица 3.12 – Сравнение точности классификации действий по сборке УЗИП при использовании разных наборов признаков (составлено автором)

Набор признаков	Метрика точности классификации		
	Accuracy	F1-мера	ROC AUC
Признаки расстояния	0,86	0,86	0,97
Признаки углов	0,89	0,89	0,98
Геометрические признаки	0,50	0,50	0,73
Временная область признаков	0,97	0,97	1,00
Частотно-временная область признаков	0,85	0,85	0,96
Временная и частотно-временная область признаков	0,98	0,98	1,00

3.5 Сравнение разработанного алгоритма с известными методами распознавания действий человека в видеопотоке

На основе полученных наборов данных в ходе выполнения лабораторных и промышленных испытаний было выполнено сравнение точности классификации действий человека, выполняющего ТОиР и производственные работы, разработанного алгоритма с существующими методами распознавания действий человека в видеопотоке. Результаты сравнения приведены в таблице 3.13.

Таблица 3.13 – Результаты сравнения разработанного алгоритма идентификации производственных процессов ТОиР с существующими алгоритмами обработки видеопотока для классификации действий человека (составлено автором)

Алгоритм	ТОиР центробежного насоса			ТОиР электрического щита			Сборка УЗИП		
	Метрика точности классификации			Метрика точности классификации			Метрика точности классификации		
	Accuracy	F1-мера	ROC AUC	Accuracy	F1-мера	ROC AUC	Accuracy	F1-мера	ROC AUC
Разработанный	0,93	0,93	0,99	0,87	0,87	0,94	0,98	0,98	1,00
X3D [110]	0,79	0,79	0,95	0,93	0,93	1,00	0,98	0,98	0,99
SlowFast [109]	0,67	0,66	0,85	0,93	0,93	0,99	0,96	0,96	0,99
I3D [174]	0,71	0,69	0,87	0,93	0,92	0,99	0,98	0,98	0,99
ST-GCN [173]	0,22	0,22	0,66	0,63	0,53	0,94	0,62	0,58	0,92
Videomae [169]	0,42	0,38	0,64	0,63	0,62	0,89	0,69	0,68	0,86
Vivit [90]	0,33	0,30	0,46	0,07	0,19	0,39	0,73	0,73	0,94
Timesformer [95]	0,34	0,35	0,43	0,09	0,06	0,60	0,22	0,11	0,54

Результаты показали высокую эффективность предложенного алгоритма при классификации схожих действий, выполняемых человеком в рамках ТОиР. При

этом низкие показатели метрик точности у большинства известных алгоритмов обусловлены обучением классификации различных категорий действий, что ограничивает область их применения для разделения действий внутри одной категории, например, такой как процессы ТОиР.

3.6 Выводы по главе 3

Представлены результаты экспериментальных исследований алгоритма идентификации производственных процессов ТОиР. По полученным результатам установлено, что контроль за сотрудником на основе анализа перемещения его рук во время работы позволяет распознать выполнение производственных процессов. Сравнение выбора набора признаков при классификации действий по ТОиР показал, что использование временных и частотно-временных параметров для временных рядов по трем группам признаков позволяет достичь наилучших результатов классификации по трем метрикам качества.

В результате проведенных лабораторных и промышленных испытаний обработка видеопотока, содержащего движение рук человека, на основе предложенного алгоритма идентификации позволила классифицировать действия по ТОиР с точностью не менее 86 %.

Выполнено сравнение разработанного алгоритма идентификации производственных процессов ТОиР с существующими методами распознавания действий человека на основе анализа видеопотока, которое показало высокую эффективность применения предложенного алгоритма для классификации схожих действий, выполняемых человеком в рамках ТОиР.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

4.1 Оценка показателей эффективности технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования

Результатом экспериментальных исследований являются обученные модели машинного обучения, которые классифицируют набор признаков, характеризующих выполняемые человеком действия. На основе разработанного алгоритма идентификации производственных процессов разработано программное обеспечение с целью практического применения моделей машинного обучения. На основе проведенных лабораторных и промышленных экспериментов разработан веб-интерфейс, позволяющий взаимодействовать с обученной моделью путем загрузки видеофайлов выполнения производственных работ для последующего распознавания действий, предварительно обученной модели. На рисунке 4.1 представлен веб-интерфейс начальной страницы программного обеспечения, позволяющий выбрать одну из обученных моделей машинного обучения.

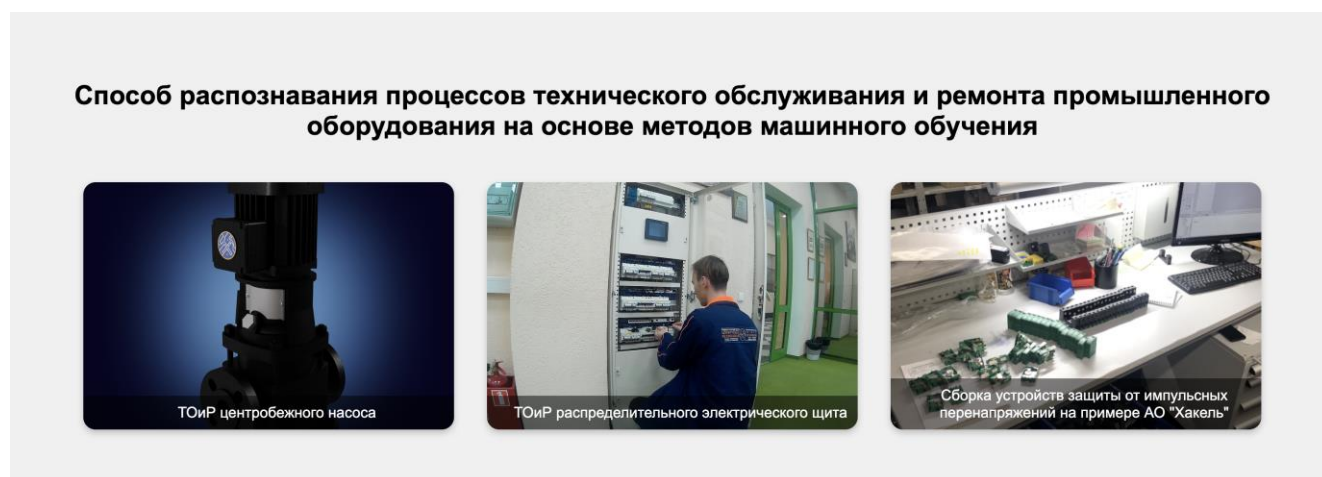


Рисунок 4.1 – Разработанный веб-интерфейс (составлено автором)

Выбор одной из моделей позволяет загрузить видеофайл в программный сервис и отобразить на экране действия, которые в данный момент выполняются. На рисунке 4.2 представлена веб-страница с отображением видеопотока, содержащего процессы ТОиР и работу модели классификации действий при

техническом обслуживании и ремонте центробежного насоса. В левой части экрана отображается видеопоток, содержащий выполнение определенной работы человека, справа – идентификация действий, которые он выполняет. На графике снизу отображается вероятность для каждого класса, которые заложены в модель машинного обучения. В процессе смены действий вероятность классов перераспределяется и график с выполняемыми действиями изменяет свой результат. На основе полученного графика определяется продолжительность выполнения действия по ТОиР. По рисунку 4.2 определено, что первое действие «Снятие защитных кожухов муфт» в эксперименте выполнялось в течение 45 секунд, а затем было начато выполнение следующего действия. Таким образом, на основе идентификации действий выполняется оценка продолжительности ТОиР и хронометраж каждого действия.

Техническое обслуживание и ремонт центробежного насоса

[На главную](#)

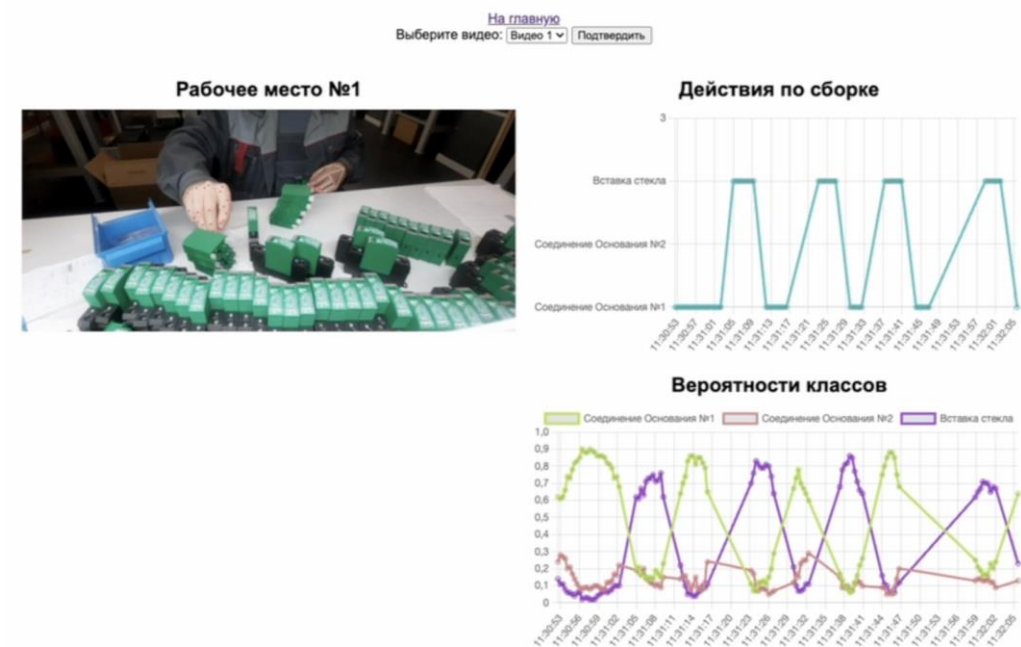


Рисунок 4.2 – Веб-интерфейс с отображением работы модели классификации действий ТОиР центробежного насоса (составлено автором)

На рисунке 4.3 показаны результаты идентификации действий во время сборки УЗИП. По графикам выполняемых действий в веб-интерфейсе видно, что выделяется определенная форма сигнала, по которой можно судить о собранном устройстве, то есть выполнении всех трех действий, необходимых для этого по

технологии. Более того, по графикам вероятности можно судить об уверенном распознавании действий моделью машинного обучения, что видно по разнице в значениях вероятности между классами.

Сборка устройств защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП)



Сборка устройств защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП)

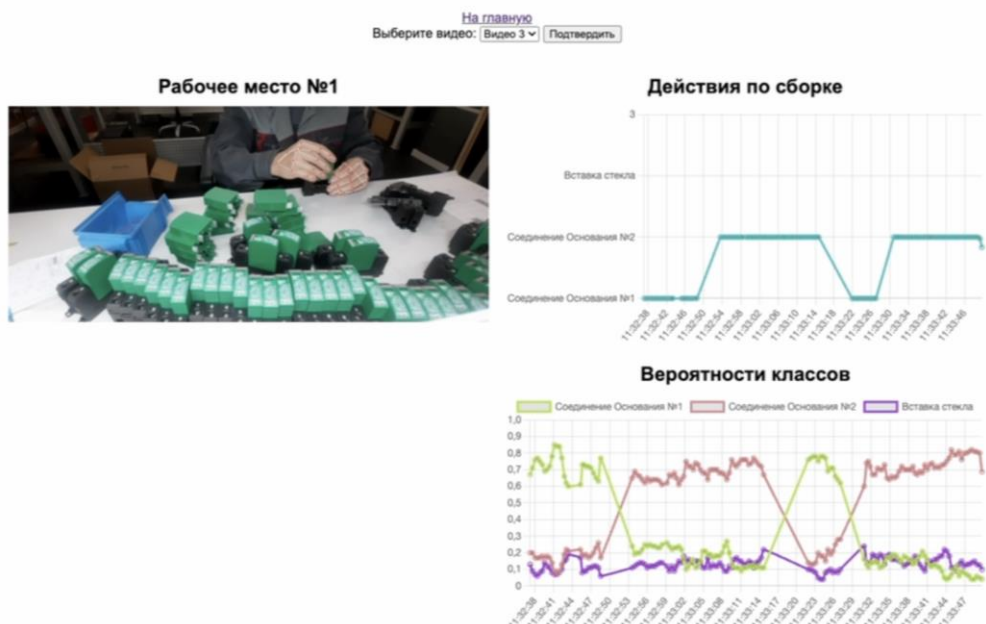


Рисунок 4.3 – Веб-интерфейс для отображения результатов классификации производственных действий сборки УЗИП (составлено автором)

На основе идентификации действий рассчитываются показатели эффективности, определенные в ГОСТ Р 57330-2016 «Системы технического

обслуживания и ремонта. Ключевые показатели эффективности» [31], например, такие как продолжительность выполнения работы, численность задействованного персонала. В дополнении к действиям по сборке УЗИП рассчитано количество собранных устройств и средняя продолжительность сборки каждого устройства [29, 30].

В работе программного сервиса в случае идентификации действий по установке деталей в матрицу принтера для нанесения маркировки, наблюдаются небольшие паузы в действиях сотрудника, что видно по тонкой линии на графике действий по сборке, а также на графике вероятностей в видео пропусков значений (рисунок 4.4). Это говорит о том, что в данные промежутки времени сотрудник отвлекался от установки деталей в матрицу принтера, что может происходить по нескольким причинам – для того, чтобы взять новую деталь для установки в матрицу либо по иным причинам. Таким образом, по полученному графику можно оценить количество времени, затраченное на процесс установки каждой детали.

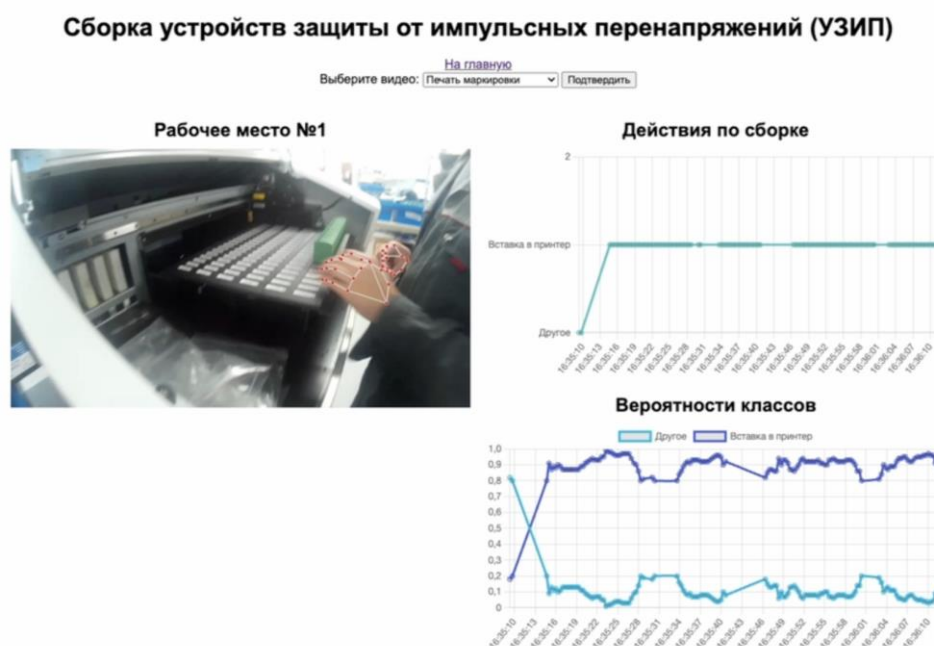


Рисунок 4.4 – Пример идентификации действий вставки деталей устройства в принтер для нанесения маркировки (составлено автором)

На основе полученных графиков и известной технологии изготовления устройств на производстве появляется возможность оценивать количество собранных устройств и продолжительность сборки каждого устройства с

последующим анализом этого времени. На рисунке 4.5 показаны результаты подсчета количества собранных устройств во время работы сотрудника. Сборка устройства считается на основе выполнения необходимой последовательности действий в соответствии с технологией производства. По продолжительности выполнения каждого действия определяется время сборки каждого устройства и, соответственно, за анализируемый промежуток времени – время самой быстрой сборки, самой медленной и среднее время, затрачиваемое сотрудников на сборку одного устройства.

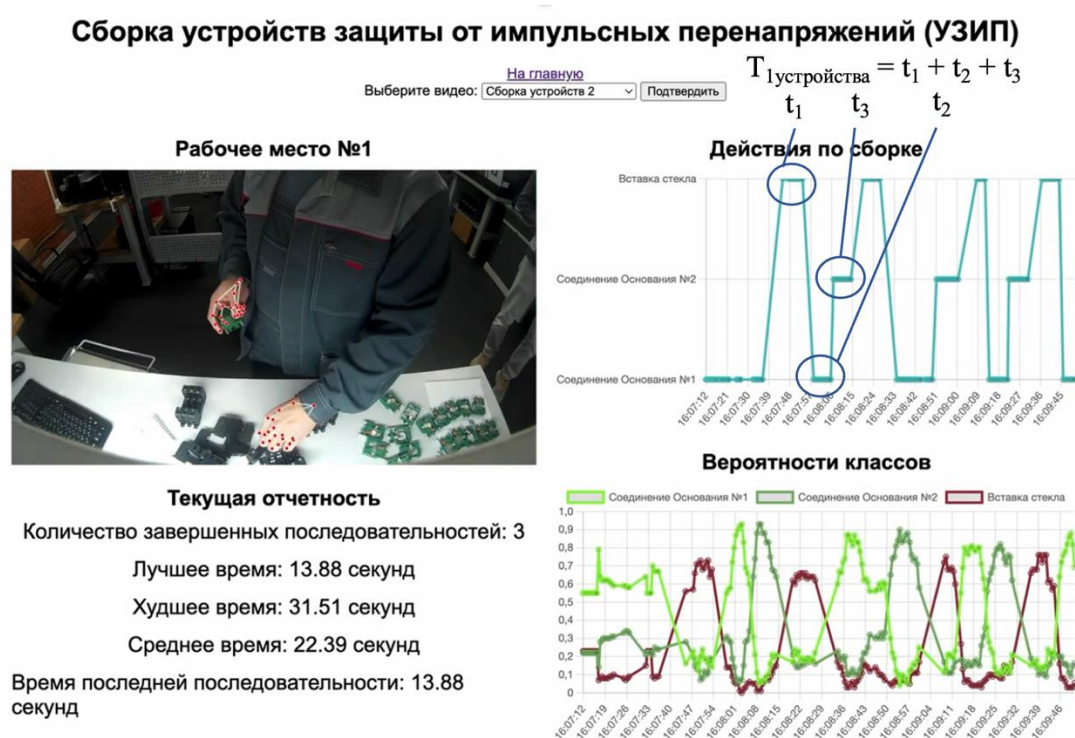


Рисунок 4.5 – Определение количества собранных устройств и оценка продолжительности сборки каждого устройства (составлено автором)

Идентификация действий в процессе выполнения производственных работ позволяет автоматически контролировать производственный процесс и управлять им. Например, на рисунке 4.6 показан отрезок времени, на котором нарушена технология сборки УЗИП, а именно, устройство собрано без вставки стекла в деталь №1, то есть действие «Вставка стекла» не выполнялось.

Сборка устройств защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП)

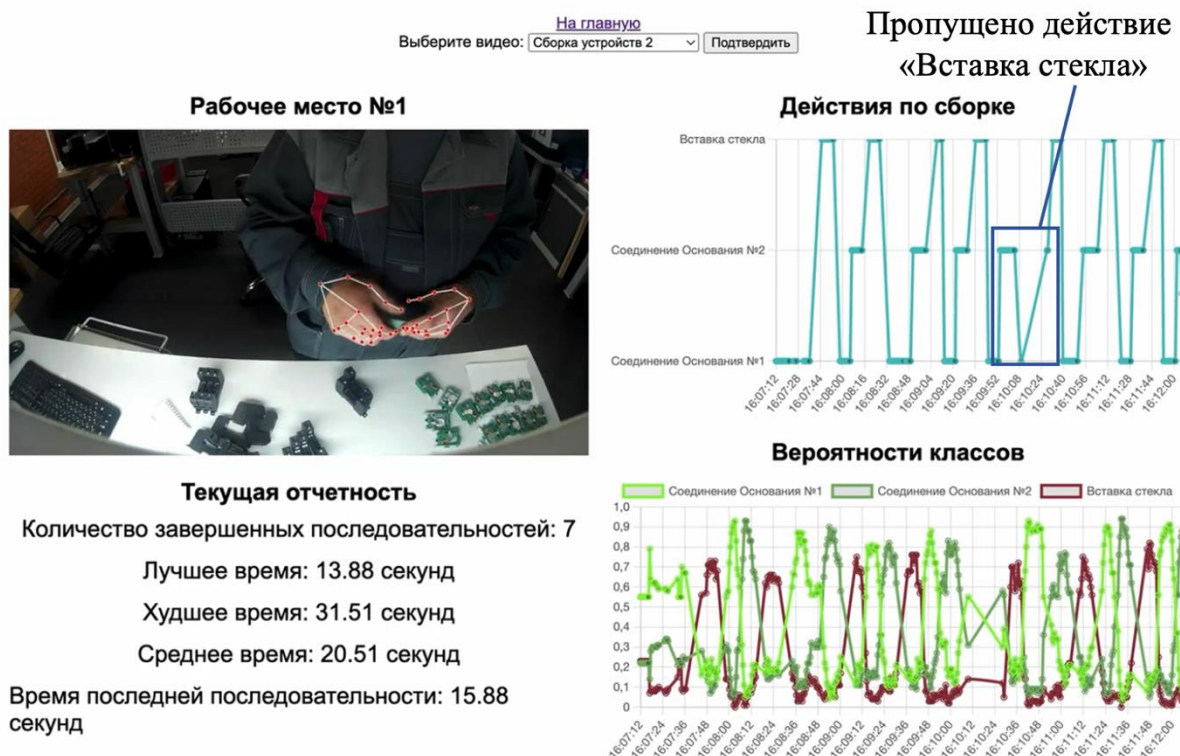


Рисунок 4.6 – Пропуск действия при сборке УЗИП (составлено автором)

Таким образом, получен брак, который выявится только на этапе контроля качества выпускаемой продукции, однако использование разработанного решения позволяет еще на этапе производства определить брак и исправить устройство до передачи в отдел контроля качества.

4.2 Оценка требований к вычислительным ресурсам аппаратного обеспечения

Реализация программного обеспечения с моделями машинного обучения требует соответствующих аппаратных вычислительных способностей. Для этого была проведена сравнительная оценка вычислительных устройств для обработки видеофайлов представленным в данной работе алгоритмом идентификации производственных процессов. Для оценки вычислительных ресурсов были выбраны как стационарные персональные компьютеры, так и ноутбуки и микроконтроллеры. Оценка проводилась путем обработки одного видео, где в первом эксперименте вычисления выполнялись только на процессоре вычислительного устройства, а во втором эксперименте – только на видеокарте

вычислительного устройства. Эксперимент повторялся 20 раз для каждого вычислительного устройства. В результате обработки видеофайла оценивалось продолжительность обработки и частота обрабатываемых кадров. Во всех экспериментах использовалось одинаковое видео продолжительностью 20 секунд.

Для выполнения эксперимента предложенный алгоритм идентификации был адаптирован для многопоточного вычисления с целью использования его для работы на видеокартах вычислительных устройств. На рисунке 4.7 представлена блок-схема оптимизированного алгоритма идентификации на основе многопоточного вычисления. Таким образом, реализация многопоточного вычисления позволила вынести расчеты введенных групп признаков и их обработку во временной и частотно-временной области в отдельные потоки.

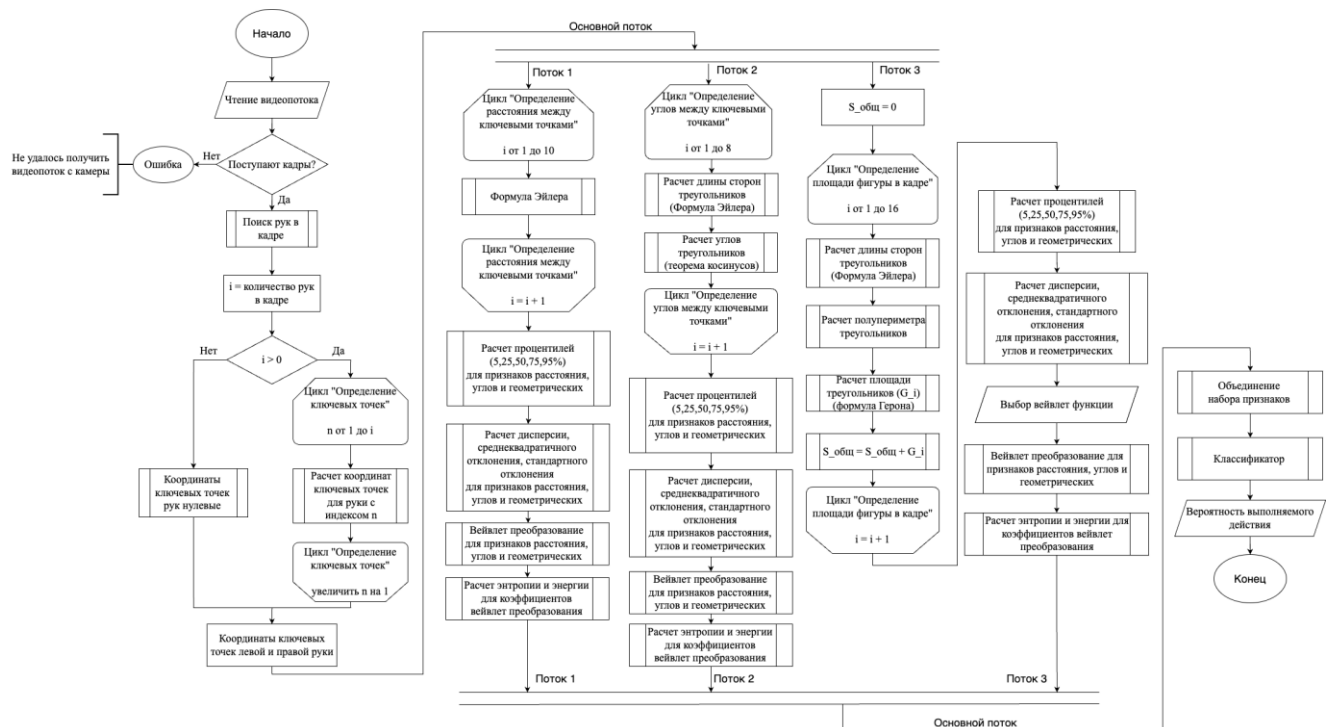


Рисунок 4.7 – Блок-схема многопоточного алгоритма идентификации производственных процессов ТОиР (составлено автором)

Результаты экспериментального исследования аппаратного обеспечения представлены в таблицах 4.1 (вычисление на процессоре) и 4.2 (вычисление на видеокарте), где отображены средние значения полученных параметров.

Таблица 4.1 – Оценка аппаратного обеспечения при вычислении на процессоре
(составлено автором)

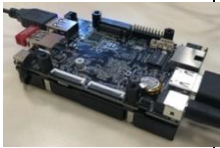
Название устройств	Ноутбук MacBook Pro	Системный блок Forsite 750D	Системный блок (сборный)	Ноутбук MSI GP66 Leopard	Микро-контроллер Rockchip RK3588
Внешний вид					
Процессор	M1 Pro (10-ядерный процессор) ARM	Intel Core i9-10940X 3.30GHz	AMD Ryzen 7 5700G 3.8GHz	Intel Core i7-11800H 2.30GHz	Quad-core Cortex-A76
Время обработки, сек.	64,8	116,4	78,9	107,5	195,6
FPS, кадров/сек	9,3	5,1	7,6	5,6	3,4

Таблица 4.2 – Оценка аппаратного обеспечения при вычислении на видеокарте
(составлено автором)

Название устройств	Ноутбук MacBook Pro	Системный блок Forsite 750D	Системный блок (сборный)	Ноутбук MSI GP66 Leopard	Микро-контроллер Rockchip RK3588
Внешний вид					
Видеокарта	M1 Pro (16-ядерный процессор) ARM	NVIDIA GeForce RTX 2080 Ti (11 Гб)	NVIDIA GeForce RTX 3060 (8 Гб)	NVIDIA GeForce RTX 3080 (8 Гб)	ARM Mali-G610
Время обработки, сек.	24,6	26,5	21,8	19,0	69,6
FPS, кадров/сек	42,3	38,8	47,6	54,4	8,6

На рисунке 4.8 представлено сравнение времени вычислений и частоты обработки кадров при расчетах на процессоре и видеокарте вычислительных устройств.

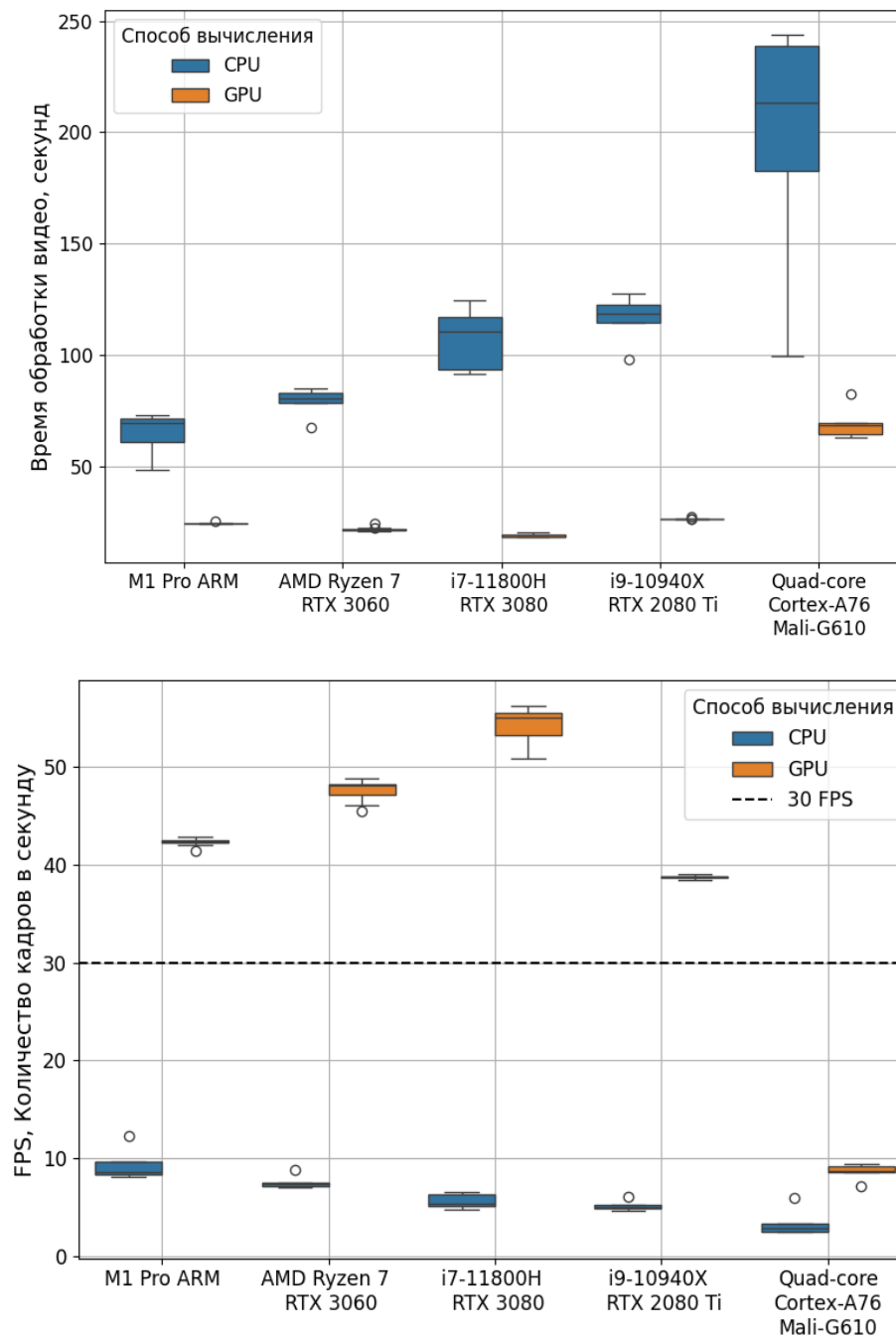


Рисунок 4.8 – Сравнение вычислительных ресурсов аппаратного обеспечения при обработке видеопотока однопоточным и многопоточным алгоритмом (составлено автором)

Представленное распределение полученных значений позволяет сделать вывод о возможности применения разработанного программного обеспечения для работы в режиме реального времени. Для этого вычислительному устройству необходимо обрабатывать видеопоток со скоростью, превышающей скорость поступающих кадров с видеокамеры. В проведенном эксперименте обрабатываемый видеопоток обновлялся с частотой 30 кадров в секунду, что

является стандартной частотой обновления кадров для большинства видеокамер. Среди используемых в эксперименте вычислительных устройств для обработки видеопотока в режиме реального времени могут применяться все рассматриваемые вычислительные устройства за исключением микроконтроллера, при условии вычислений на видеокарте.

4.3 Взаимодействие программно-аппаратного комплекса с уровнями АСУ ТП и АСУП для информационного сопровождения жизненного цикла промышленного оборудования

Предложенный программно-аппаратный комплекс может являться модульным решением в автоматизированных системах управления ТООР [30]. В работах [129, 131, 132] подробно рассмотрены интеллектуальные системы поддержки принятия решения для сервисных инженеров для контроля технического состояния оборудования во время его эксплуатации. В описанных работах архитектура системы и методология ее реализации основана на технологии дополненной реальности. Результатом работы этих и подобных решений является помощь в контроле технического состояния технологического оборудования, выявление неисправности или идентификация ее потенциального появления. На основе дополнительно поступающей информации составляются заявки на ТООР, где указаны мероприятия и действия, необходимые для проведения во время ТООР. С другой стороны, предложенное решение в данной диссертационной работе в виде программно-аппаратного комплекса предназначено для контроля выполнения составленных мероприятий на ТООР и оценке производительности и времени выполнения производственных работ [20, 47]. На рисунке 4.9 представлена схема модулей в автоматизированной системе управления ТООР, на основе которых осуществляются функции автоматической генерации заявок на ТООР и также автоматического контроля их выполнения.

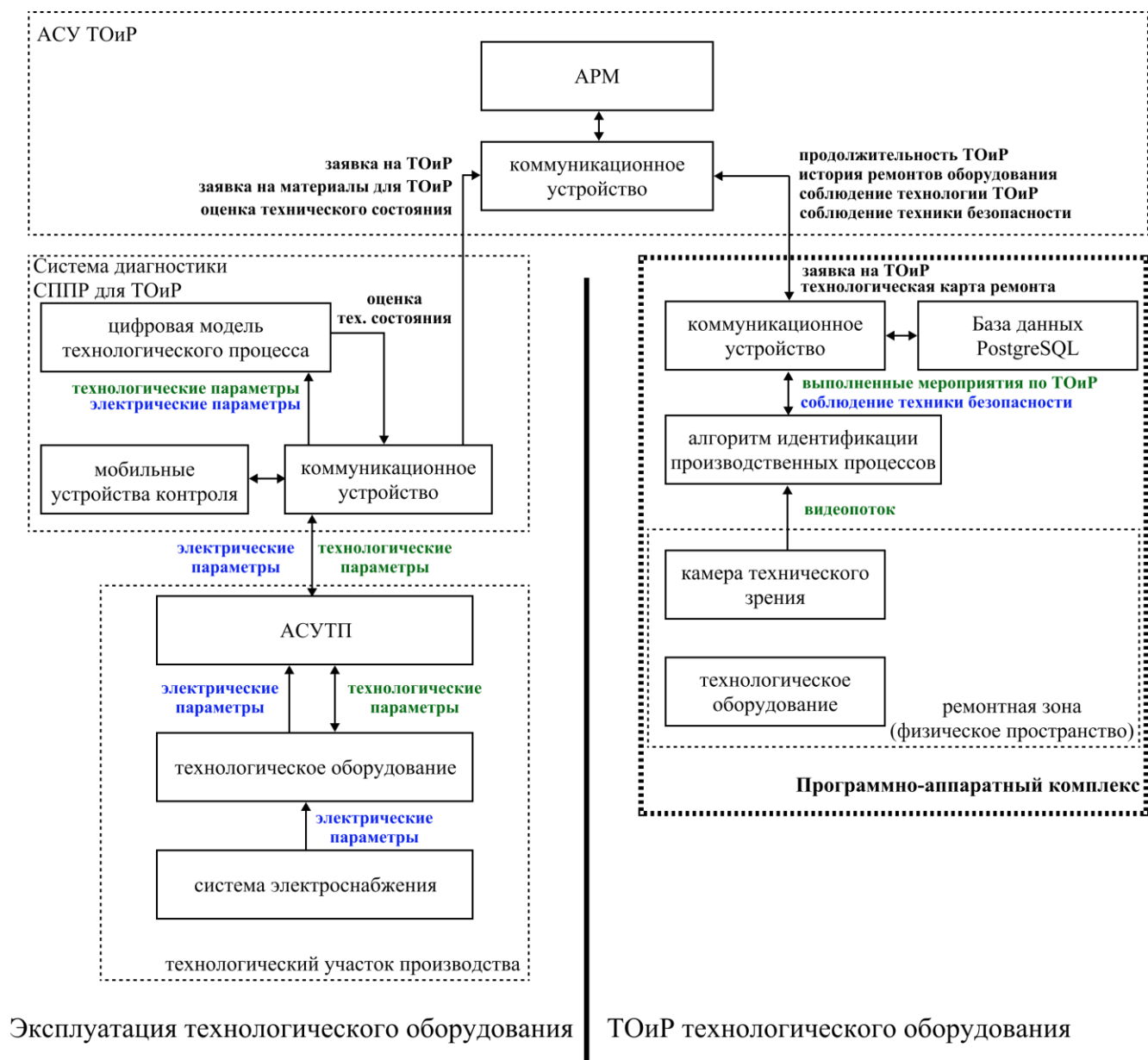


Рисунок 4.9 – Схема взаимодействия программно-аппаратного комплекса с уровнями АСУ ТП и АСУП для информационного сопровождения жизненного цикла промышленного оборудования (составлено автором)

Представленное взаимодействие реализуется следующим образом. Система диагностики и система поддержки принятия решений (СППР) для ТОиР выполняет функцию контроля технического состояния оборудования во время его эксплуатации на технологическом участке производства. Для эксплуатации технологического оборудования необходимо его подключение к системе электроснабжения. Технологические параметры оборудования передаются через промышленную информационную сеть в АСУ ТП, включающую программируемый логический контроллер, локальный сервер АСУ ТП и SCADA-

систему. ПЛК реализует управление технологическим процессом и передает технологические параметры оборудования на локальный сервер АСУ ТП для сбора и хранения, отображение технологических параметров реализовано в SCADA-системе. Система диагностики на основе технологических и электрических параметров оборудования рассчитывает техническое состояние оборудования и проводит оценку наличия дефектов и неисправностей в технологическом оборудовании. СППР получает технологические и электрические параметры оборудования, информацию о дефектах и неисправностях от локального сервера АСУ ТП и электрические параметры технологического оборудования из системы электроснабжения через OPC протокол передачи данных, который реализован в локальном OPC-сервере коммуникационного устройства. Локальный OPC-сервер обеспечивает коммуникационную связь между СППР, системой диагностики, АСУ ТП и технологическим участком производства. Локальный OPC-сервер через OPC протокол передает технологические параметры из АСУ ТП и электрические параметры от системы электроснабжения в цифровую модель технологического процесса. Цифровая модель технологического процесса моделирует технологический процесс технологического участка производства на основе полученных параметров от локального OPC-сервера. Результатом моделирования цифровой модели технологического процесса является информация об остаточном ресурсе оборудования при эксплуатации в технологическом процессе, а также прогнозирование состояния оборудования при текущем режиме работы. Цифровая модель технологического процесса функционирует непрерывно и в режиме реального времени передает результаты моделирования на локальный OPC-сервер. Доступ к данным локального OPC-сервера осуществляется через MQTT протокол. Для этого в коммуникационном устройстве СППР расположен MQTT брокер, который предоставляет доступ к данным локального OPC-сервера MQTT клиентам. В качестве MQTT клиентов применяется программное обеспечение, предназначенное для использования на мобильных устройствах (телефоны, планшеты), персональных компьютерах, очках дополненной реальности. Информационное соединение между MQTT брокером и локальным OPC-сервером

позволяет MQTT клиентам производить мониторинг текущего состояния технологического оборудования, изменять параметры цифровой модели технологического процесса, чтобы определить оптимальный режим работы технологического оборудования при его текущем состоянии и прогнозном развитии дефектов. Полученная информация о текущем состоянии технологического оборудования передается в модуль обработки информации, который составляет заявки на техническое обслуживание и ремонт технологического оборудования и заявки на необходимые запчасти и материалы, и отправляет их на сервер АСУ ТООР для согласования и подтверждения.

Разработанный программно-аппаратный комплекс выполняет функцию мониторинга процессов ТООР технологического оборудования в ремонтной зоне. Для этого в ремонтной зоне установлена камера технического зрения, которая также может быть расположена на сервисных инженерах посредством использования носимых устройств. Видеопоток с камеры технического зрения поступает на локальный сервер устройства сбора и обработки информации для сбора и хранения исходного видеопотока технического обслуживания и ремонта технологического оборудования в базе данных. Исходный видеопоток, содержащий техническое обслуживание и ремонт технологического оборудования, поступает в модуль обработки информации, где определяются действия, которые выполняются во время ТООР технологического оборудования, которые сопоставляются с заявкой на ТООР, которая поступает из АСУ ТООР. На основе идентификации действий в модуле обработки информации рассчитываются показатели эффективности, определенные в ГОСТ Р 57330-2016 «Системы промышленной автоматизации и интеграция. Системы технического обслуживания и ремонта. Ключевые показатели эффективности»[31]. На основе рассчитанных показателей эффективности составляется отчет и выводится на ПК. Отчет о выполнении заявки на техническое обслуживание и ремонт, показатели эффективности ТООР технологического оборудования, выполненные действия во время технического обслуживания и ремонта, показатели эффективности сотрудников, выполняющих техническое обслуживание и ремонт передаются на

локальный сервер АСУ ТООР, выступающий в качестве MES (EAM) системы предприятия.

АСУ ТООР выполняет функции управления производственными ресурсами, связанными с техническим обслуживанием и ремонтом технологического оборудования. Функции управления осуществляются на основе информации, поступающей из СППР, АСУ ТП и системы диагностики во время эксплуатации технологического оборудования и программно-аппаратного комплекса во время ТООР технологического оборудования в ремонтной зоне. Во время эксплуатации технологического оборудования от модуля обработки информации поступает информация на сервер АСУ ТООР о текущем состоянии оборудования, имеющихся дефектах и неисправностях, прогнозировании состояния технологического оборудования. С сервера АСУ ТООР информация поступает в модуль обработки информации, в котором реализуются функции управления персоналом, участвующим в проведении ТООР, управление складскими запасами и материалами, ведением учета эффективности функционирования сотрудников, участвующих в техническом обслуживании и ремонте, ведением учета технического состояния оборудования и историй ремонта. При формировании заявки на техническое обслуживание и ремонт из модуля обработки информации поступает на локальный сервер АСУ ТООР и передается в модуль обработки информации разработанного программно-аппаратного комплекса.

4.4 Выводы по главе 4

Разработано программное обеспечение на основе предложенного алгоритма, позволяющее идентифицировать действия сотрудника во время работы и оценивать такие показатели эффективности, как продолжительность выполнения производственных работ, количество выполненных действий, что необходимо для подсчета количества собранных УЗИП, и осуществлять контроль технологии выполнения производственных работ, в том числе соблюдение очередности выполнения действий.

Представлена сравнительная оценка вычислительных ресурсов аппаратного обеспечения при использовании алгоритма идентификации производственных

процессов. По результатам установлено, что при идентификации производственных процессов на основе предложенного алгоритма в режиме реального времени необходимо обрабатывать видеопоток со скоростью, превышающей скорость поступающих кадров с видеокамеры. Среди используемых в эксперименте вычислительных устройств для обработки видеопотока в режиме реального времени могут применяться все рассматриваемые вычислительные устройства, за исключением микроконтроллера, при условии вычислений на видеокарте. Это говорит о необходимости использования серверных мощностей при реализации работы программно-аппаратного комплекса в режиме реального времени.

Разработана схема взаимодействия программно-аппаратного комплекса с уровнями АСУ ТП и АСУП для информационного сопровождения жизненного цикла промышленного оборудования, которая обеспечивает информационное взаимодействие этапа эксплуатации технологического оборудования с процессами технического обслуживания и ремонта. Предложенное взаимодействие позволяет обеспечить автоматический контроль за возникающими дефектами в оборудовании во время эксплуатации с последующим контролем действий, выполняемых для устранения дефектов во время ТОиР.

ГЛАВА 5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА

5.1 Обоснование экономического эффекта

Экономическая эффективность представленного исследования заключается в сокращении затрат на ТОиР за счет автоматического контроля действий сотрудника, автоматизированному составлению отчетов о выполненной работе, что снижает нагрузку на руководителей отделов ТОиР и отдел контроля качества, а также своевременному исправлению брака на производстве. Таким образом, доход предприятия от использования разработанного программно-аппаратного комплекса заключается в повышении эффективности управления производственными процессами руководящего персонала.

Экономическая оценка эффективности внедрения информационных систем управления производством, по мнению многих исследователей, является непростой задачей [8, 63, 64, 68] в связи со сложностью расчета денежных потоков предприятия и экономии денежных средств от внедрения системы управления производством. Данному вопросу посвящено множество научных работ по разработке сложных экономических моделей учета движения денежных средств и оценке экономической эффективности информационных систем предприятия [26, 39, 44, 66]. В данной работе оценка экономической эффективности проводилась на основе проведенного промышленного эксперимента и может быть адаптирована для другого производственного процесса.

На рисунке 5.1 представлена схема, отражающая эффект от применения программно-аппаратного комплекса. Эффект предложенного решения заключается в сокращении сроков производственных процессов за счет своевременного обнаружения брака на производстве, а также автоматическому ведению текущей отчетности о выполненной работе.

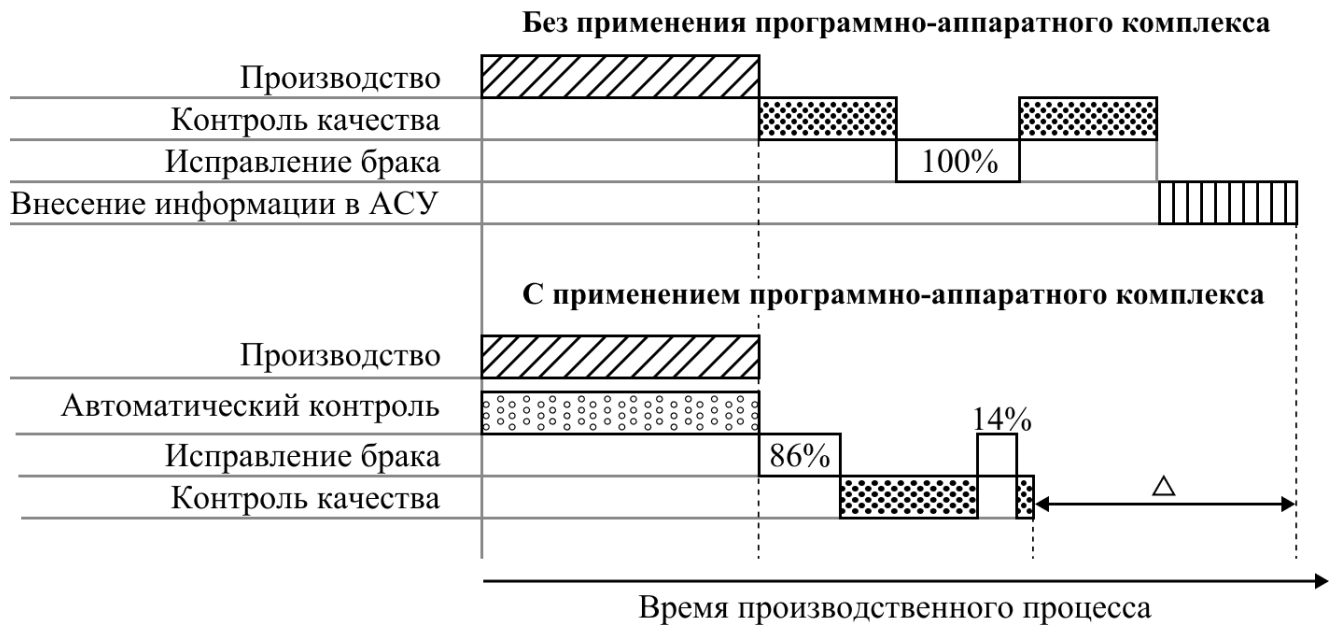


Рисунок 5.1 – Диаграмма Ганта, отражающая эффект от применения программно-аппаратного комплекса (составлено автором)

Приведенная диаграмма Ганта отражает случаи выполнения производственных работ с появлением брака. Соответственно, без применения программно-аппаратного комплекса весь полученный брак на производстве исправляется после проверки качества выполненных работ, что соответствует времени устранения 100 % полученного брака и повторной проверки качества. Применение программно-аппаратного комплекса позволяет осуществлять автоматический контроль выполняемых производственных работ и устранять появление брака на этапе производства. В предложенном алгоритме идентификации производственных процессов обучена модель машинного обучения, которая с точностью не менее 86 % распознает действия и может определить брак или отклонение в действиях сотрудника во время работы. Таким образом, можно считать, что неопознанный брак или погрешность работы программно-аппаратного комплекса возможна в 14 % случаев. Поэтому оставшаяся часть брака исправляется после проверки качества выполненных работ.

В случае выполнения производственных работ без брака на производстве эффект от внедрения программно-аппаратного комплекса заключается в автоматическом ведении текущей отчетности о выполненных работах.

Таким образом, на основе приведенной диаграммы Ганта, время производственного процесса может быть представлено в виде формулы 5.1:

$$t_{\text{производственного процесса}}^{\text{без прогр.-апп.комплекса}} = t_{\text{пр-ва}} + t_{\text{контр}} + t_{\text{испр}} + t_{\text{контр}} + t_{\text{док}}, \quad (5.1)$$

где $t_{\text{пр-ва}}$ – время выполнения производственных работ, ч.; $t_{\text{контр}}$ – время ручного контроля качества выполненных производственных работ, ч.; $t_{\text{испр}}$ – время исправления брака, ч.; $t_{\text{док}}$ – время документирования и внесения информации в АСУ предприятия, ч.

Тогда время производственного процесса при использовании программно-аппаратного комплекса примет вид (формула 5.2):

$$t_{\text{производственного процесса}}^{\text{с прогр.-апп.комплексом}} = t_{\text{пр-ва}} + 0,86 \cdot t_{\text{испр}} + t_{\text{контр}} + 0,14 \cdot t_{\text{испр}} + 0,14 \cdot t_{\text{контр}}, \quad (5.2)$$

где $t_{\text{пр-ва}}$ – время выполнения производственных работ, ч.; $t_{\text{контр}}$ – время ручного контроля качества выполненных производственных работ, ч.; $t_{\text{испр}}$ – время исправления брака, ч.

Время, затрачиваемое для выявления брака $t_{\text{выявл.брак}}$ – это время непосредственно производственных работ по исправлению брака $t_{\text{испр}}$, а также затраченное время производства от ожидания проведения контроля и установления брака $t_{\text{контр}}$, в результате которого выявляется брак. Поэтому, основываясь на формулах 5.1 и 5.2, время, затрачиваемое на производстве для выявления брака, может быть записано в виде системы уравнений, где одно уравнение отражает использование программно-аппаратного комплекса, а второе – без его использования (формула 5.3):

$$\begin{cases} t_{\text{выявл.брак}}^{\text{без прогр.-апп.комплекса}} = t_{\text{контр}} + t_{\text{испр}} + t_{\text{контр}} \\ t_{\text{выявл.брак}}^{\text{с прогр.-апп.комплексом}} = 0,86 \cdot t_{\text{испр}} + t_{\text{контр}} + 0,14 \cdot t_{\text{испр}} + 0,14 \cdot t_{\text{контр}} \end{cases}, \quad (5.3)$$

где $t_{\text{выявл.брак}}^{\text{без прогр.-апп.комплекса}}$ – время выявления брака без применения программно-аппаратного комплекса, ч.; $t_{\text{выявл.брак}}^{\text{с прогр.-апп.комплексом}}$ – время выявления брака с применением программно-аппаратного комплекса, ч.

Упрощая выражение, получим систему уравнений, представленных в формуле 5.4:

$$\begin{cases} t_{\text{выявл. брак}}^{\text{без прогр.-апп. комплекса}} = 2 \cdot t_{\text{контр}} + t_{\text{испр}} \\ t_{\text{выявл. брак}}^{\text{с прогр.-апп. комплексом}} = 1,14 \cdot t_{\text{контр}} + t_{\text{испр}} \end{cases} \quad (5.4)$$

Для сравнения эффекта применения программно-аппаратного комплекса и оценки сокращения времени выявления брака определим, что время ручного контроля качества выполненных производственных работ $t_{\text{контр}}$ и время непосредственных работ по исправлению брака $t_{\text{испр}}$ зависят от объемов выполненных производственных работ, то есть от $t_{\text{пр-ва}}$. Поэтому введем два коэффициента x и y , отражающих долю описанных переменных от общего времени производства, а также коэффициент z , отражающий долю сокращения времени производственного процесса для выявления брака при использовании программно-аппаратного комплекса. Таким образом, формула 5.4 примет следующий вид (формула 5.5):

$$\begin{cases} t_{\text{выявл. брак}}^{\text{без прогр.-апп. комплекса}} = 2 \cdot x \cdot t_{\text{пр-ва}} + y \cdot t_{\text{пр-ва}}, & x, y \geq 0 \\ z \cdot t_{\text{выявл. брак}}^{\text{без прогр.-апп. комплекса}} = 1,14 \cdot x \cdot t_{\text{пр-ва}} + y \cdot t_{\text{пр-ва}}, & x, y, z \geq 0 \end{cases} \quad (5.5)$$

где $x = \frac{t_{\text{контр}}}{t_{\text{пр-ва}}}$; $y = \frac{t_{\text{испр}}}{t_{\text{пр-ва}}}$; $z = \frac{t_{\text{выявл. брак}}^{\text{без прогр.-апп. комплекса}}}{t_{\text{выявл. брак}}^{\text{с прогр.-апп. комплексом}}}$.

Выражая коэффициент z из второго уравнения в системе, получим следующую зависимость (формула 5.6):

$$z = \frac{1,14 \cdot x + y}{2 \cdot x + y} \quad (5.6)$$

Таким образом, получена зависимость коэффициента z , характеризующего долю сокращения времени производственного процесса для выявления брака, от времени исправления брака и времени контроля выполненных производственных работ. Графическое отображение установленной зависимости приведено на рисунке 5.2.

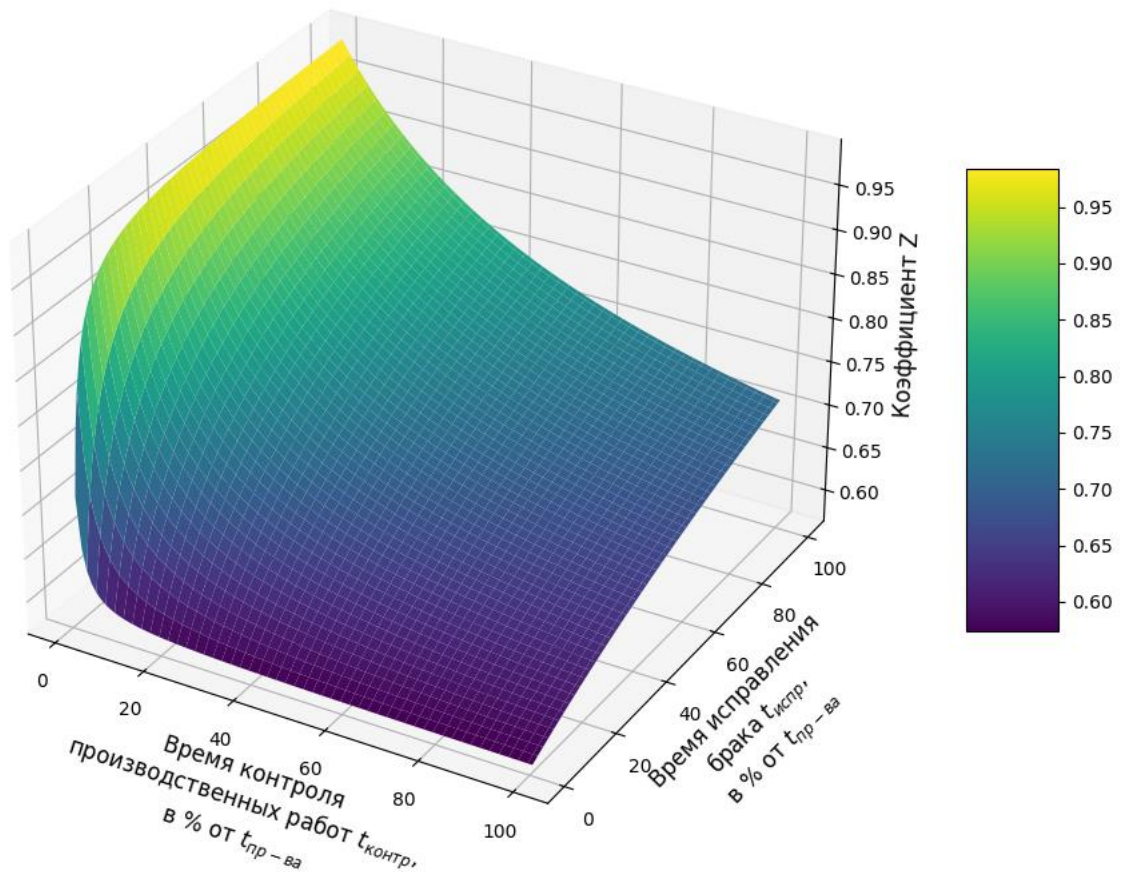


Рисунок 5.2 – Зависимость коэффициента z доли сокращения времени выявления брака от времени исправления брака и времени контроля производственных работ (составлено автором)

Исходя из установленной зависимости следует, что диапазон изменения значений коэффициента z находится в пределах $[0,57; 1]$. Данное распределение значений справедливо для случаев производства с появлением брака. При выполнении производственных работ, в результате которого отсутствует брак, то сокращение времени производственного процесса заключается в автоматическом документировании выполненных работ. В отличных случаях, имеющих определенную долю брака на производстве, требующего устранения, эффективность будет иметь показатель в зависимости от соотношения времени, затрачиваемого на контроль и исправления брака. Например, при времени исправления брака, сильно превышающем время контроля производственного процесса ($t_{\text{испр}} \gg t_{\text{контр}}$), коэффициент $z \rightarrow 1$, следовательно, эффективность от автоматического контроля на фоне необходимого длительного времени

исправления снижается. И, наоборот, при необходимости длительного контроля производственного процесса ($t_{\text{испр}} \ll t_{\text{контр}}$), коэффициент $z \rightarrow 0,57$, и эффективность применения программно-аппаратного комплекса, который заменит ручной контроль автоматическим, увеличивается.

5.2 Оценка показателей экономической эффективности

Исходные данные, необходимые для расчета показателей экономической эффективности, приведены ниже и отражают основные параметры операционной деятельности предприятия, на котором выполнялся промышленный эксперимент:

- примерная стоимость 1 УЗИП: 8 тыс. руб.
- 1 партия УЗИП содержит 1 тыс. устройств.
- время полного цикла производства 1 УЗИП ($t_{\text{производства 1 шт}}$) составляет 5 минут (включает подготовку материалов, подготовку устройств к печати маркировки и время печати маркировки, сборка устройства).
- время, затрачиваемое на исправление брака ($t_{\text{исправления брака}}$), составляет 10% от времени сборки устройства.
- время, затрачиваемое на контроль выполненного производственного процесса ($t_{\text{контроля}}$), составляет 50 % от времени сборки устройства.
- время, затрачиваемое на документирование и внесение информации в АСУ предприятия ($t_{\text{документирование}}$), составляет 10 % от времени сборки устройства.

Время производства партии можно оценить следующим образом (формула 5.7):

$$\begin{aligned} t_{\text{производства}} &= t_{\text{производства 1 шт}} \cdot 1 \text{ тыс. шт.} = 5 \text{ мин} \cdot 1 \text{ тыс. шт.} = \\ &= 5000 \text{ мин} \approx 83 \text{ раб. ч.} \approx 11 \text{ раб. дней.} \end{aligned} \quad (5.7)$$

Таким образом, подставляя исходные данные в формулы 5.1 и 5.2, получим:

$$\begin{aligned} t_{\text{партии}}^{\text{без системы}} &= 11 + 0,5 \cdot 11 + 0,1 \cdot 11 + 0,5 \cdot 11 + 0,1 \cdot 11 = 24,2 \text{ раб. дней} \\ t_{\text{партии}}^{\text{с системой}} &= 11 + 0,86 \cdot 0,1 \cdot 11 + 0,5 \cdot 11 + 0,14 \cdot 0,1 \cdot 11 + 0,14 \cdot 0,5 \cdot 11 = 18,4 \text{ раб. дней} \end{aligned}$$

Сокращение в сроках реализации 1 партии УЗИП составляет около 6 рабочих дней, что в процентном соотношении составляет 24 %. При условии, что предприятие за календарный год реализует 3 партии, производство которых

контролируется предложенным решением, то сокращение сроков производства обеспечивает дополнительное эффективное время производства. В стоимостном выражении сокращение сроков производственного процесса может быть представлена следующим образом:

Без использования системы (формула 5.8):

$$3 \frac{\text{партий}}{\text{год}} \cdot 8 \frac{\text{тыс.руб.}}{\text{шт}} \cdot 1000 \frac{\text{шт.}}{\text{партия}} = 24\,000 \frac{\text{тыс.руб.}}{\text{год}} \quad (5.8)$$

С использованием системы (формула 5.9):

$$3 \frac{\text{партий}}{\text{год}} \cdot 1,24 \cdot 8 \frac{\text{тыс.руб.}}{\text{шт}} \cdot 1000 \frac{\text{шт.}}{\text{партия}} = 29\,760 \frac{\text{тыс.руб.}}{\text{год}} \quad (5.9)$$

Эффект в стоимостном выражении составит 5760 тыс. руб. в год.

Для того чтобы определить экономическую эффективность проекта были рассчитаны показатели экономической эффективности – NPV, PI, IRR, DPP. Для этого были составлены капитальные (CAPEX) и операционные (OPEX) затраты на реализацию проекта. В таблице 5.1 представлены статьи капитальных затрат (CAPEX), отражающие стоимость начальных инвестиций, необходимых для реализации проекта.

Таблица 5.1 – Капитальные затраты на реализацию проекта (составлено автором)

Наименование затрат	Значение
Заработная плата разработчиков	2400 тыс. руб.
Отчисления в фонды (30% от ЗП)	720 тыс. руб.
Оборудование для разработки ПО	350 тыс. руб.
Видеокамера	10 тыс. руб.
Микроконтроллер Rockchip RK3588	30 тыс. руб.
Карта памяти 128 Гб (microSD карта)	1 тыс. руб.
Аренда сервера для вычислений	24 тыс. руб.
ВСЕГО	3535 тыс. руб.

В таблице 5.2 представлены ежемесячные операционные затраты (OPEX) после внедрения проекта в производство. Согласно документации, микроконтроллер Rockchip RK3588 при нагрузке потребляет ток 300 мА. Питание микроконтроллера однофазное от 12 В. Таким образом, потребление электроэнергии рассчитывается по формуле 5.10 и составит:

$$P = 12 \text{ В} \cdot 300 \text{ мА} \cdot 1 \text{ ч} = 3,6 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 0,0036 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (5.10)$$

Стоимость электроэнергии для предприятий Ленинградской области составляет примерно $8 \frac{\text{руб}}{\text{кВт}\cdot\text{ч}}$. Тогда годовое потребление электроэнергии микроконтроллером составляет $12 \text{ месяцев} \cdot 30 \text{ дней} \cdot 8 \text{ ч} \cdot 8 \frac{\text{руб}}{\text{кВт}\cdot\text{ч}} \cdot 0,0036 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \approx 250 \frac{\text{руб.}}{\text{год}}$.

Аренда сервера для вычислений составляет 6 тыс. руб./мес., тогда в год составит 72 тыс. руб./год.

Таблица 5.2 – Годовые операционные затраты после внедрения проекта (составлено автором)

Наименование затрат	Значение
Потребление электроэнергии микроконтроллером	0,25 тыс. руб.
Аренда сервера для вычислений	72 тыс. руб.
ВСЕГО	72,25 тыс. руб.

Горизонт планирования проекта составляет 6 лет, до 2030 года. Ставка дисконтирования для расчетов принята 20 %. Поток денежных средств (ДС) по годам и дисконтированный денежный поток (ДП) представлен в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Расчет потока денежных средств (составлено автором)

Номер года	0	1	2	3	4	5	6
Год	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Приток ДС, тыс. руб.	0	0	5 760,00	5 760,00	5 760,00	5 760,00	5 760,00
Отток ДС, тыс. руб.	0	3 535,00	72,25	72,25	72,25	72,25	72,25
Поток ДС, тыс. руб.	0	-3 535,00	5 687,75	5 687,75	5 687,75	5 687,75	5 687,75
Коэффициент дисконтирования	-	1	0,83	0,69	0,58	0,48	0,40
Дисконтированный ДП, тыс. руб.	0	-3 535,00	4 739,79	3 949,83	3 291,52	2 742,93	2 285,78
Накопленный дисконтированный ДП, тыс. руб.	0	-3 535,00	1 204,79	5 154,62	8 446,14	11 189,08	NPV 13 474,85

На рисунке 5.3 представлен график изменения денежных потоков, где чистая приведенная стоимость (NPV) проекта к 2030 году составит почти 13,5 млн руб. Дисконтированный срок окупаемости (DPP) проекта может быть определен по формуле 5.11:

$$DPP = \frac{\text{Дисконтированный ДП}}{\text{Начальные инвестиции}} = \frac{4739,79, \text{тыс.руб.}}{3535 \text{ тыс.руб.}} = 1,3 \text{ года} \quad (5.11)$$

Индекс доходности (PI) показывает доходность от вложенных инвестиций и определяется по формуле 5.12:

$$PI = 1 + \frac{NPV}{I_0} = 1 + \frac{13\,474,85 \text{ тыс.руб.}}{3535 \text{ тыс.руб.}} = 4,8 \quad (5.12)$$

Внутренняя норма доходности (IRR) составляет 160 %.

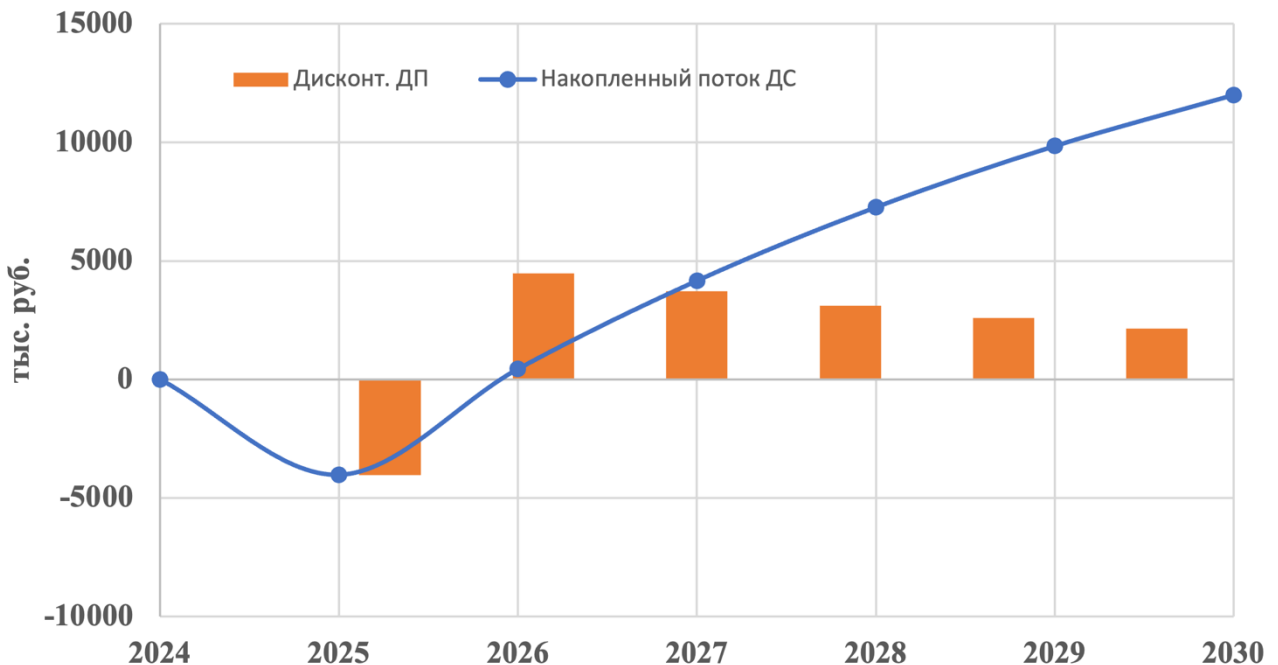


Рисунок 5.3 – График окупаемости проекта (составлено автором)

На рисунке 5.4 представлен календарный план внедрения проекта в виде диаграммы Ганта. Общая продолжительность внедрения проекта составляет 5 месяцев.

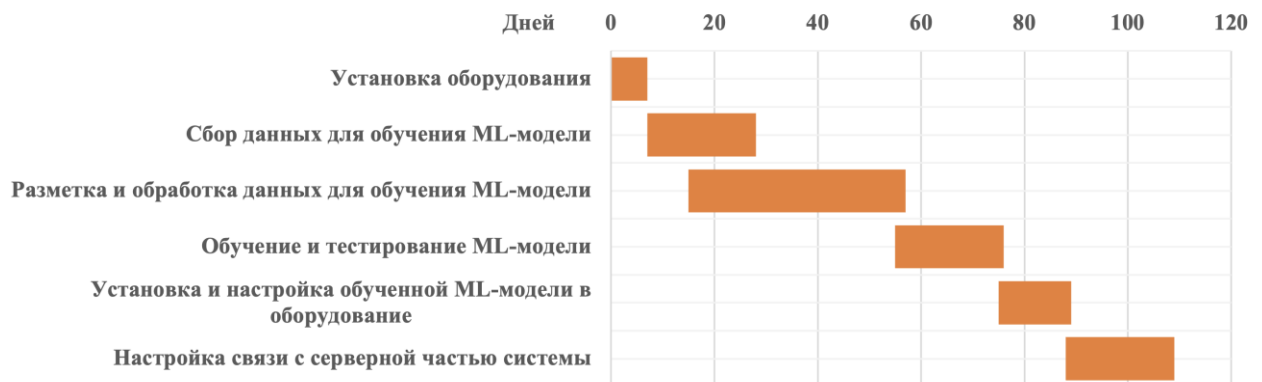


Рисунок 5.4 – Календарный план внедрения проекта (составлено автором)

5.3 Выводы по главе 5

Проведенная экономическая оценка результатов исследования представляет собой оценку проекта, предусматривающего использование программного и

аппаратного обеспечения в производственном процессе. Эффект от использования результатов заключается в автоматическом контроле за действиями сотрудника и автоматическому созданию отчетов о выполненной работе, то есть за счет сокращения нагрузки на руководителей подразделений и отдела контроля качества выпускаемой продукции, что приводит к сокращению времени выполнения производственного процесса за счет сокращения времени на выявление брака. Другие эффекты не оценивались, но могут быть рассмотрены при технической организации с другими информационными системами на уровне АСУ ТП и АСУП.

Приведена диаграмма Ганта, отражающая эффект от применения программно-аппаратного комплекса для автоматического контроля производственных процессов. Установлена зависимость между коэффициентом, характеризующим долю сокращения времени выявления брака от коэффициента, характеризующего соотношения времени непосредственно работы по исправлению брака на производстве и времени контроля производственных работ. Доказан эффект от применения программно-аппаратного комплекса, позволяющий сократить сроки производственного процесса, затрачиваемого на выявление брака.

Приведены расчеты показателей экономической эффективности внедрения программно-аппаратного комплекса для автоматического контроля производственных процессов на примере выполненного промышленного эксперимента. Результаты расчетов показали эффект в сокращении времени производственного процесса на 24 %. Чистая приведенная стоимость проекта по внедрению решения составляет 13,5 млн руб. при начальных инвестициях в 3,5 млн руб. с учетом горизонта планирования до 2030 года. Срок окупаемости составил 1,3 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационном исследовании представлено новое решение актуальной научно-технической задачи повышения эффективности управления производственными процессами за счет автоматического контроля процессов ТОиР промышленного оборудования

По результатам исследования сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. В результате анализа научно-технических проблем в области управления ТОиР выявлен низкий уровень квалификации сотрудников, выполняющих ТОиР, отсутствие решений для автоматического контроля процессов ТОиР, закрытые архитектуры АСУ ТОиР, что в совокупности определяет направления, развитие которых может обеспечить повышение эффективности в управлении и организации производственных процессов промышленного предприятия, а именно: разработка эффективных методов обучения с применением цифровых технологий дополненной реальности, развитие систем поддержки принятия решений для оперативного персонала с учетом изменений в стратегиях выполнения ТОиР в сторону предсказательного обслуживания, разработка средств автоматизации для контроля процессов ТОиР с целью обеспечения прозрачности в выполнении ремонтных работ промышленного оборудования.

2. Установлено, что методы идентификации действий человека на основе алгоритмов компьютерного зрения применимы в области технического обслуживания и ремонта оборудования при извлечении характерных признаков, основанных на движении рук человека.

3. Разработан алгоритм идентификации производственных процессов ТОиР промышленного оборудования, использующий модель машинного обучения, для которой экспериментально обоснован набор признаков, полученный на основе анализа видеопотока, содержащего движение рук человека.

4. Разработан программно-аппаратный комплекс, на основе которого предложено решение для его интеграции в структуру АСУ ТП и АСУП, что обеспечивает информационное сопровождение жизненного цикла промышленного оборудования, в том числе автоматический контроль процессов ТОиР,

составляемых на основе оценки технического состояния при эксплуатации оборудования.

5. Рассчитаны показатели экономической эффективности применения программно-аппаратного комплекса для автоматизации управления ТОиР промышленного оборудования, основанные на результатах промышленных испытаний, которые доказывают повышение эффективности управления производством за счет снижения сроков выполнения производственных работ. Срок окупаемости составил 1,3 года, NPV через 6 лет составит почти 13,5 млн руб. при начальных инвестициях в 3,5 млн руб.

Представленные технические решения в диссертационном исследовании имеют практическое применение в производственной деятельности и могут быть адаптированы к другим ручным операциям, отличным от приведенных в экспериментах.

Перспективным направлением развития темы исследования является изучение вопросов идентификации производственных процессов при выполнении ремонтных работ группой людей, находящихся в одном кадре видеокамеры, разработка методов и алгоритмов для идентификации объектов, с которыми взаимодействует человек во время ТОиР оборудования, что может позволить создать цифровой двойник процесса ремонта оборудования на основе действий сотрудника с целью применения в информационных системах поддержки принятия решений.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АСУ ТОиР – автоматизированная система управления техническим обслуживанием и ремонтом;

АСУ ТП – автоматизированная система управления технологическим процессом;

АСУП – автоматизированная система управления производством;

ВВП – валовой внутренний продукт;

КИПиА – контрольно-измерительные приборы и автоматика;

МСК – минерально-сырьевой комплекс;

ПЛК – программируемый логический контроллер;

ППР – планово-предупредительный ремонт;

СППР – система поддержки принятия решений;

ТОиР – техническое обслуживание и ремонт;

ТЭК – топливно-энергетический комплекс;

УЗИП – устройство защиты от импульсных перенапряжений;

CMMS – computerized maintenance management system, система компьютерного управления обслуживанием оборудования;

CNN – convolutional neural network, свёрточная нейронная сеть;

CPU – central processing unit, центральный процессор;

DPP – discounted payback period, дисконтируемый срок окупаемости;

ЕАМ-система – enterprise asset management, система управления активами предприятия;

ERP – enterprise resource planning, система управления ресурсами предприятия;

FPS – frames per second, количество кадров в секунду;

GPU – graphics processing unit, графический процессор;

IRR – internal rate of return, внутренняя норма доходности;

LSTM – long short-term memory, нейронная сеть с долгой кратковременной памятью;

MES – manufacturing execution system, система управления производством;

MQTT – Message Queue Telemetry Transport, протокол обмена сообщениями по шаблону издатель-подписчик;

NPV – net present value, чистая приведенная стоимость;

OPC UA – Open Platform Communications Unified Architecture, протокол передачи данных в промышленных сетях;

PI – profitability index, индекс доходности;

RCM – reliability centered maintenance, техническое обслуживание, ориентированное на надежность;

TPM – total productive maintenance, комплексное техническое обслуживание.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамович, Б.Н. Внедрение технологий интеллектуальных электрических сетей на нефтедобывающих предприятиях / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, Д.А. Устинов // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2011. – № 6. – С. 4-9.
2. Абрамович, Б.Н. Энергобезопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев // Горный Информационно-Аналитический Бюллетень (научно-Технический Журнал). – 2015. – № S7. – С. 737-744.
3. Алисултанова, Э.Д. Технологии машинного обучения в бизнесе на основе нейронных сетей / Э.Д. Алисултанова, У.Р. Тасуев, Н.А. Моисеенко // Вестник ГГНТУ. Технические Науки. – 2021. – Т. 17. – № 2 (24). – С. 5-10. – DOI: 10.34708/GSTOU.2021.68.10.001.
4. Амхаев, Т.Ш. Внедрение современных интеллектуальных устройств в региональную энергосистему на примере Чеченской Республики / Т.Ш. Амхаев, М.В. Дебиев, У.Р. Асхабов, С.Х. Масаев // Вестник ГГНТУ. Технические Науки. – 2024. – Т. 20. – № 1 (35). – С. 14-22. – DOI: 10.26200/GSTOU.2024.68.25.002.
5. Амхаев, Т.Ш. Автоматизированная система учета электроэнергии в электрических сетях Чеченской Республики с использованием Web-Технологий / Т.Ш. Амхаев, М.В. Дебиев, С.Х. Масаев // Вестник ГГНТУ. Технические Науки. – 2022. – Т. 18. – № 4 (30). – С. 13-23. – DOI: 10.34708/GSTOU.2022.27.96.002.
6. Антоненко, И.Н. Эволюция практик и информационных систем управления ТОиР / И.Н. Антоненко, И.Э. Крюков // Автоматизация в промышленности. – 2011. – № 10. – С. 27-30.
7. Ануфриев, А.С. Новые подходы для повышения эффективности автоматизированных систем управления переделами рудоподготовки / А.С. Ануфриев, Е.А. Лебедик (Соколова), В.Ю. Бажин // Горный Информационно-Аналитический Бюллетень (научно-Технический Журнал). – 2024. – № 2. – С. 76-92. – DOI: 10.25018/0236_1493_2024_2_0_76.
8. Асланова, И.В. Оценка эффективности внедрения MES-системы в

условиях мелкосерийного производства / И.В. Асланова, О.В. Милёхина (Гридчина). – [Электронный ресурс] // Сборник трудов VI Всероссийской научно-практической конференции с зарубежным участием: Цифровая трансформация экономических систем: проблемы и перспективы (ЭКОПРОМ-2022). – Санкт-Петербург : Политех-Пресс, 2022. – С. 256-259. – DOI: 10.18720/IEP/2021.4/74. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49852587> (дата обращения: 29.11.2024).

9. Бажин, В.Ю. Комплексный контроль состояния токоподводящих стальных стержней электролизеров Содерберга с использованием систем технического зрения / В.Ю. Бажин, А.А. Кульчицкий, Д.Н. Кадров // Цветные Металлы. – 2018. – № 3. – С. 27-32. – DOI: 10.17580/tsm.2018.03.04.

10. Бажин, В.Ю. Обоснование выбора платформы для создания системы управления материальными потоками в производстве металлургического кремния / В.Ю. Бажин, О.Н. Масько, А.С. Ануфриев // Горный Информационно-Аналитический Бюллетень (научно-Технический Журнал). – 2024. – № 1-1. – С. 206-219. – DOI: 10.25018/0236_1493_2024_011_0_206.

11. Бажин, В.Ю. Автоматизированный контроль и управление балансом шихты при производстве металлургического кремния / В.Ю. Бажин, О.Н. Масько, С.А. Мартынов // Цветные Металлы. – 2023. – № 4. – С. 53-60. – DOI: 10.17580/tsm.2023.04.07.

12. Белоглазов, И.И. Контроль технологического процесса в рудно-термической печи на основе постоянной составляющей фазного напряжения / И.И. Белоглазов, А.П. Суслов, А.А. Педро // Сталь. – 2014. – № 12. – С. 32-36.

13. Белоглазов, И.Н. Цель промышленной автоматизации - повышение эффективности производства / И.Н. Белоглазов // Металлург. – 2009. – № 5. – С. 75-76.

14. Булатов, В.В. Методика обнаружения пороков стекла с применением камеры технического зрения / В.В. Булатов, И.И. Абакумов, А.А. Кульчицкий // Научно-Технические Ведомости Санкт-Петербургского Государственного Политехнического Университета. – 2011. – № 4 (135). – С. 163-168.

15. Булатов, В.В. Фильтрация изображений пороков при контроле качества стекол оптико-электронными системами / В.В. Булатов, А.В. Статкевич, А.А. Кульчицкий // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2021. – № 3. – С. 8-15. – DOI: 10.25791/asu.3.2021.1264.

16. Бухановский, А.В. Интеллектуальные технологии цифровой трансформации промышленных производств / А.В. Бухановский // Доклады Российской Академии Наук. Математика, Информатика, Процессы Управления. – 2022. – Т. 508. – № 1. – С. 33-40. – DOI: 10.31857/S2686954322070037.

17. **Вальнев, В.В.** Исследование эффективности совместного применения системы дополненной реальности и систем динамического моделирования при выполнении технического обслуживания нефтяных насосов / **В.В. Вальнев.** – [Электронный ресурс] // Тезисы докладов 76-ой Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ – 2022». – Москва, 25–29 апреля 2022 года : Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2022. – Т. 2. – С. 188-189. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=52692969> (дата обращения: 23.02.2025).

18. **Вальнев, В.В.** К вопросу об автоматизации технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования / **В.В. Вальнев**, Н.И. Котелева // Современные наукоемкие технологии. – 2024. – № 5-2. – С. 276-283. – DOI: 10.17513/snt.40040.

19. **Вальнев, В.В.** Программный сервис по обслуживанию и ремонту оборудования на основе дополненной реальности / **В.В. Вальнев**, Н.И. Котелева. – [Электронный ресурс] // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых: Сборник материалов. – Москва, 23–27 октября 2023 года : Институт проблем комплексного освоения недр РАН, 2023. – С. 262-265. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=65648205> (дата обращения: 23.02.2025).

20. **Вальнев, В.В.** Система мониторинга и контроля производственных процессов обслуживания и ремонта оборудования АСУТП / **В.В. Вальнев**, Н.И. Котелева. – [Электронный ресурс] // Сборник тезисов XIII Конгресса молодых ученых. – Санкт-Петербург, 9-11 апреля 2024 года : федеральное государственное

автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», 2024. – С. 67-68. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=74521508> (дата обращения: 04.12.2024).

21. **Вальнев, В.В.** Новый подход к автоматизации технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования / **В.В. Вальнев**, Н.И. Котелева, Д.Н. Суворов // Вестник ГГНТУ. Технические науки. – 2024. – Т. 20. – № 1(35). – С. 34-48. – DOI: 10.26200/GSTOU.2024.63.96.004.

22. **Вальнев, В.В.** Применение дополненной реальности и динамического моделирования для проведения технического обслуживания и ремонта нефтяных насосов / **В.В. Вальнев**. – [Электронный ресурс] // Тезисы докладов XVIII Международного форума-конкурса студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования». – Санкт-Петербург, 15–20 мая 2022 года : Санкт-Петербургский горный университет, 2022. – Т. 2. – С. 347-349. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50332234> (дата обращения: 23.02.2025).

23. **Вальнев, В.В.** Применение системы дополненной реальности для технического обслуживания и ремонта насосов / **В.В. Вальнев**. – [Электронный ресурс] // Тезисы докладов XVIII Всероссийской конференции-конкурса студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования». – Санкт-Петербург, 15–17 апреля 2020 года : Санкт-Петербургский горный университет, 2020. – С. 272-273. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=65584822> (дата обращения: 23.02.2025).

24. Вахидова, К.Л. Алгоритм распознавания основных дефектов поверхностей колец подшипников с применением метода фрактальной размерности и нейронных сетей / К.Л. Вахидова, М.Ш. Минцаев, М.Р. Исаева, В.В. Пашаев // Инженерный Вестник Дона. – 2022. – № 3 (87). – С. 124-132.

25. Волошин, А.А. Архитектура программного-аппаратного комплекса «Цифровой двойник энергосистемы» / А.А. Волошин, Е.А. Волошин, А.А. Лебедев, Н.С. Лебедева // Электрические Станции. – 2023. – № 10 (1107). – С. 37-41. – DOI: 10.34831/EP.2023.1107.10.007.

26. Гизатуллина, Е.Н. Оценка эффективности системы управления

персоналом сельскохозяйственных предприятий: экономический аспект / Е.Н. Гизатуллина, О.А. Сизоненко // Экономика и парадигма нового времени. – 2023. – № 1 (18). – С. 36-42.

27. Годяев, А.И. Автоматизированная интеллектуальная система мониторинга параметров функционирования технических средств железнодорожной автоматики с выявлением предотказных состояний и прогнозированием причин их возникновения / А.И. Годяев, А.А. Онищенко // Вестник Тихоокеанского Государственного Университета. – 2018. – № 4 (51). – С. 49-56.

28. Гольдштейн, В.Г. Диагностические модели для оценки технического состояния электрооборудования электростанций и подстанций / В.Г. Гольдштейн, А.Н. Назарычев, А.Ю. Хренников // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2011. – № 3. – С. 41-44.

29. ГОСТ 18322-2016. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. Введен 01.09.2017. М.: Стандартинформ, 2017. 16 с.

30. ГОСТ Р 57329-2016. Системы промышленной автоматизации. Системы технического обслуживания и ремонта. Термины и определения. Введен 01.06.2017. М.: Стандартинформ, 2019. 19 с.

31. ГОСТ Р 57330-2016. Системы промышленной автоматизации и интеграция. Системы технического обслуживания и ремонта. Ключевые показатели эффективности. Введен 01.06.2017. М.: Стандартинформ, 2020. 26 с.

32. Грачев, В.В. Применение технологий Industry 4.0 при создании автоматизированных промышленных комплексов / В.В. Грачев, Л.П. Мышляев, М.К. Венгер и др. // Сборник научных трудов Новосибирского Государственного Технического Университета. – 2021. – № 1 (100). – С. 7-20. – DOI: 10.17212/2307-6879-2021-1-7-20.

33. Евстафьев, И.Н. Автоматизация системы управления ТООР и аутсорсинг ТООР металлургического оборудования / И.Н. Евстафьев // Металлургические процессы и оборудование. – 2009. – № 1 (15). – С. 44-49.

34. Елкина, О.С. Внутренние угрозы энергетической безопасности и пути их нейтрализации / О.С. Елкина, С.Е. Елкин, В.А. Сырчин // Теоретическая Экономика. – 2021. – № 10 (82). – С. 56-70. – DOI: 10.52957/22213260_2021_10_56.

35. Ерохин, Е.А. Эволюция систем технического обслуживания и ремонта оборудования / Е.А. Ерохин, А.Н. Осинцев // Организатор производства. – 2009. – Т. 43. – № 4. – С. 37-41.

36. Жуков, И.В. Автоматизация получения водорода в процессах нефтепереработки / И.В. Жуков, Н.Г. Новожилов, В.Г. Харазов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2020. – № 6 (563). – С. 30-33. – DOI: 10.33285/0132-2222-2020-6(563)-30-33.

37. Измайлов, М.К. Сравнительный анализ современных ЕАМ-систем, используемых в Российской и зарубежной практике / М.К. Измайлов // Beneficium. – 2020. – № 2 (35). – С. 35-42.

38. Информационная и функциональная безопасность АСУ ТП. – Режим доступа: <https://openapc.ru/tpost/n7likdgmel-informatsionnaya-i-funktsionalnaya-bezor> (дата обращения: 15.12.2024). – [Электронный ресурс].

39. Калинина, Е.А. Повышение эффективности деятельности промышленного предприятия при внедрении автоматизированной информационной системы объективного контроля / Е.А. Калинина, М.С. Люблинский // Вестник Ивановского Государственного Университета. Серия: Экономика. – 2023. – № 1 (55). – С. 84-89.

40. Кашин, Д.А. Оптический контроль качества брикетированной металлошихты / Д.А. Кашин, А.А. Кульчицкий // Цветные Металлы. – 2022. – № 9. – С. 92-98. – DOI: 10.17580/tsm.2022.09.13.

41. Ключевые направления политики в области импортозамещения: взгляд бизнеса. – Режим доступа: <https://rspp.ru/activity/analytics/klyuchevye-napravleniya-politiki-v-oblasti-importozameshcheniya-vzglyad-biznesa/> (дата обращения: 03.11.2024). – [Электронный ресурс].

42. Козярук, А.Е. Система обслуживания электромеханического оборудования машин и механизмов по фактическому состоянию / А.Е. Козярук,

Ю.Л. Жуковский // Горное оборудование и электромеханика. – 2014. – № 10 (107). – С. 8-14.

43. Колобродов, Е.Н. Уточнённый алгоритм прогнозирования индекса технического состояния трансформатора для автоматизации планирования ТОиР / Е.Н. Колобродов, А.А. Волошин, А.И. Коваленко, А.С. Николаев // Электрические станции. – 2023. – № 9 (1106). – С. 59-64. – DOI: 10.34831/EP.2023.1106.9.007.

44. Кондратьев, В.Ю. Экономическая оценка эффективности информационных систем методиками инвестиционного анализа / В.Ю. Кондратьев, Л.К. Ефимиади // Современная экономика: проблемы и решения. – 2023. – № 11 (167). – С. 58-72. – DOI: 10.17308/meps/2078-9017/2023/11/58-72.

45. Королёв, Н.А. Диагностика и оценка технического состояния установки погружного электроцентробежного насоса по электрическим сигналам / Н.А. Королёв // Бурение и Нефть. – 2023. – № S2. – С. 141-142.

46. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023680169 Российская Федерация. Программа обнаружения действий персонала, осуществляющего сервисное и оперативное обслуживание АСУТП. Заявка № 2023668862: заявл. 14.09.2023: опубл. 27.09.2023 / Н.И. Котелева, **В.В. Вальнев**; заявитель Санкт-Петербургский горный университет.– 1 с.

47. Котелева, Н.И. Программный сервис для автоматизации работ по техническому обслуживанию и ремонту оборудования промышленных предприятий / Н.И. Котелева, **В.В. Вальнев**. – [Электронный ресурс] // Материалы трудов Международной конференции «Трудноизвлекаемые запасы нефти». – Альметьевск, 23–24 сентября 2024 года : Альметьевский государственный нефтяной институт, 2024. – С. 238-240. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=73811219&pff=1> (дата обращения: 23.12.2024).

48. Кульчицкий, А.А. Применение систем технического зрения для контроля технологических параметров и оборудования на производстве / А.А. Кульчицкий, В.В. Булатов, А.В. Бойков и др. // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. – 2017. – № 20. – С. 17-22.

49. Лебедева, Т.Г. Архитектура и управляемость дискретных динамических

систем, основанных на знаниях / Т.Г. Лебедева, Г.С. Осипов // Известия Российской Академии Наук. Теория и системы управления. – 2000. – № 5. – С. 37-43.

50. Минцаев, М.Ш. Исследование и модернизация автоматизированной системы налива нефтепродуктов / М.Ш. Минцаев, Садулаев Аюб Абдул-Вахидович, М.Р. Исаева // Инженерный Вестник Дона. – 2024. – № 9 (117). – С. 825-837.

51. Моисеенко, Н.А. Большие данные и некоторые возможности их применения / Н.А. Моисеенко, М.М. Цуев, Э.Х. Саратова // Вестник ГГНТУ. Технические Науки. – 2023. – Т. 19. – № 3 (33). – С. 15-23. – DOI: 10.26200/GSTOU.2023.65.74.002.

52. Мышляев, Л.П. Цифровизация - инструментарий для решения задач управления / Л.П. Мышляев, К.Г. Венгер, В.В. Грачев // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2021. – № 7. – С. 225-227.

53. Мышляев, Л.П. Задачи разработки, внедрения и сопровождения систем автоматизации управления промышленными объектами / Л.П. Мышляев, К.А. Ивушкин, Г.В. Макаров, В.В. Грачев // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2023. – № 9. – С. 212-215.

54. Назарычев, А.Н. Исследование надежности тягового электропривода карьерных самосвалов на основе анализа отказов его функциональных узлов / А.Н. Назарычев, Г.В. Дяченко, Ю.А. Сычев // Записки Горного института. – 2023. – Т. 261. – С. 363-373.

55. Назарычев, А.Н. О возможности проведения контроля состояния асинхронных электродвигателей с частотно-регулируемым приводом методом спектрального анализа / А.Н. Назарычев, М.А. Захаров, А.С. Страхов и др. // Вестник Ивановского Государственного Энергетического Университета. – 2024. – № 5. – С. 66-74. – DOI: 10.17588/2072-2672.2024.5.066-074.

56. Назарычев, А.Н. Метод контроля состояния обмоток роторов асинхронных электродвигателей при пуске по току статора / А.Н. Назарычев, Е.М. Новоселов, Д.А. Полкошников и др. // Дефектоскопия. – 2020. – № 8. – С. 49-55. – DOI: 10.31857/S0130308220080059.

57. Нгуен, Х.Х. Оптимизация системы управления электролитическим рафинированием меди при помощи цифрового двойника во время образования дендритного осадка / Х.Х. Нгуен, В.Ю. Бажин // *Металлург.* – 2023. – № 1. – С. 49-56. – DOI: 10.52351/00260827_2023_01_49.

58. Основные фонды и другие нефинансовые активы. – Режим доступа: <https://rosstat.gov.ru/folder/14304> (дата обращения: 06.02.2025). – [Электронный ресурс].

59. Павел Сорокин: «Российский ТЭК играет ключевую роль в мировой энергетике». – Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/press-center/news-and-events?news-item=pavel-sorokin-rossiyskiy-tek-igraet-klyuchevuyu-rol-v-mirovoy-energetike> (дата обращения: 03.11.2024). – [Электронный ресурс].

60. Педро, А.А. Контроль и управление степенью развития электрической дуги в рудно-термической печи / А.А. Педро, М.П. Арлиевский // *Сталь.* – 2008. – № 8. – С. 69b-669.

61. Петров, С.П. Разработка моделей прогнозирования с целью управления режимами электропотребления промышленных предприятий / С.П. Петров, Б.Н. Абрамович, И.С. Бабанова // *Промышленная Энергетика.* – 2017. – № 12. – С. 2-8.

62. Пыхов, П.А. Актуальные проблемы обеспечения энергетической безопасности регионов России / П.А. Пыхов. – [Электронный ресурс] // *Материалы Всероссийской научно-практической конференции Экономико-правовые проблемы обеспечения экономической безопасности.* – Екатеринбург, 17 мая 2018 года : Уральский государственный экономический университет, 2018. – С. 104-107. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36888224> (дата обращения: 06.02.2025).

63. Ревенко, Н.Ф. Трансформация подходов к организации технического обслуживания и ремонта машин и оборудования. К столетию системы планово-предупредительного ремонта / Н.Ф. Ревенко, Т.Н. Иванова, О.В. Мищенко и др. // *Вестник поволжского государственного технологического университета. Серия: экономика и управление.* – 2022. – № 2 (54). – С. 35-46. – DOI: 10.25686/2306-2800.2022.2.35.

64. Ревенко, Н.Ф. О классификации показателей для оценки эффективности функционирования службы технического обслуживания и ремонта технологического оборудования предприятия / Н.Ф. Ревенко, В.В. Семёнов, Д.Г. Загуляев // Организатор производства. – 2022. – Т. 30. – № 2. – С. 69-81.

65. Рынок автоматизированных систем управления в России в 2023 году. – Режим доступа: https://delprof.ru/upload/iblock/253/exaqj1ueko6k1pciem49we3gdj5hwvkt/Analitika_DELOVOY-PROFIL_Rynok-avtomatizirovannykh-sistem-upravleniya-v-Rossii-v-2023-godu.pdf (дата обращения: 03.11.2024). – [Электронный ресурс].

66. Симченко (Чазова), О.Л. Интегрированная информационная система как инструмент повышения эффективности промышленного предприятия / О.Л. Симченко (Чазова), Е.Л. Чазов, Л.В. Камдина и др. // Вестник Астраханского Государственного Технического Университета. Серия: Экономика. – 2023. – № 2. – С. 34-42. – DOI: 10.24143/2073-5537-2023-2-34-42.

67. Темкин, И.О. Процедура автоматического безрадарного определения скорости мобильных объектов с использованием стационарной камеры / И.О. Темкин, В.А. Епифанов, И.В. Кальгов // Программные продукты и системы. – 2023. – № 1. – С. 165-174. – DOI: 10.15827/0236-235X.141.165-174.

68. Трофимец, Е.Н. Оценка экономической эффективности проектов по внедрению MES-систем / Е.Н. Трофимец. – [Электронный ресурс] // Материалы XIII Всероссийской научно-практической конференции Экспериментальные и теоретические исследования в XXI веке: проблемы и перспективы развития. – Ростов-на-Дону, 31 мая 2018 года : Южный университет (ИУБиП), 2018. – Т. 3. – С. 248-253. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35298805> (дата обращения: 29.11.2024).

69. Указ Президента Российской Федерации от 28.02.2024 № 145 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации». – Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202402280003> (дата обращения: 03.11.2024). – [Электронный ресурс].

70. Федотова (Пегачёва), Г.А. Надежность технических объектов. Вопросы

стандартизации / Г.А. Федотова (Пегачёва), Н.И. Воропай, Г.Ф. Ковалев // Надежность и безопасность энергетики. – 2015. – № 4 (31). – С. 2-6.

71. Харазов, В.Г. Информационная система диагностики нарушений в производстве кварцевого стекла / В.Г. Харазов, Аль Г.А.О. // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. – 2019. – Т. 6. – С. 61-65.

72. Balasundaram, A. Abnormality Identification in Video Surveillance System using DCT / A. Balasundaram, G. Dilip, M. Manickam и др. // Intelligent Automation and Soft Computing. – 2021. – Т. 32. – С. 693-704. – DOI: 10.32604/iasc.2022.022241.

73. Chakraborty, D. Video Shot Boundary Detection Using Principal Component Analysis (PCA) and Deep Learning / D. Chakraborty, W. Chiracharit, K. Chamnongthai. – 2021. – 272 с. – DOI: 10.1109/ECTI-CON51831.2021.9454775.

74. Dalal, M. A secure video steganography scheme using DWT based on object tracking / M. Dalal, M. Juneja // Information Security Journal: A Global Perspective. – 2022. – Т. 31. – № 2. – С. 196-213. – DOI: 10.1080/19393555.2021.1896055.

75. Ewert, P. Comparison of the Effectiveness of Selected Vibration Signal Analysis Methods in the Rotor Unbalance Detection of PMSM Drive System / P. Ewert, C.T. Kowalski, M. Jaworski // Electronics (Switzerland). – 2022. – Т. 11. – № 11. – DOI: 10.3390/electronics11111748.

76. Gualtieri, L. A human-centered conceptual model for integrating Augmented Reality and Dynamic Digital Models to reduce occupational risks in industrial contexts : 4th International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing / L. Gualtieri, A. Revolti, P. Dallasega // Procedia Computer Science. – 2023. – Т. 217. – С. 765-773. – DOI: 10.1016/j.procs.2022.12.273.

77. Hosseinizadeh Mazloumi, S.H. Designing synchronizer module in CMMS software based on lean smart maintenance and process mining / S.H. Hosseinizadeh Mazloumi, A. Moini, M. Agha Mohammad Ali Kermani // Journal of Quality in Maintenance Engineering. – 2022. – Т. 29. – № 2. – С. 509-529. – DOI: 10.1108/JQME-10-2021-0077.

78. Jagadeesh, B. Video based action detection and recognition human using optical flow and SVM classifier / B. Jagadeesh, C.M. Patil. – [Электронный ресурс] //

IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT). – Bangalore, India : IEEE, 2016. – С. 1761-1765. – DOI: 10.1109/RTEICT.2016.7808136. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7808136> (дата обращения: 29.09.2023).

79. Rotman, D. Learnable Optimal Sequential Grouping for Video Scene Detection / D. Rotman, Y. Yaroker, E. Amrani и др. – [Электронный ресурс] // Proceedings of the 28th ACM International Conference on Multimedia : MM '20. – New York, NY, USA : Association for Computing Machinery, 2020. – С. 1958-1966. – DOI: 10.1145/3394171.3413612. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1145/3394171.3413612> (дата обращения: 19.07.2023).

80. Tuballa, M.L. A review of the development of Smart Grid technologies / M.L. Tuballa, M.L. Abundo // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – Т. 59. – С. 710-725. – DOI: 10.1016/j.rser.2016.01.011.

81. Abdelhalim, B. A novel method for video shot boundary detection using CNN-LSTM approach / B. Abdelhalim, F. Titouna // International Journal of Multimedia Information Retrieval. – 2022. – Vol. 11. – P. 1-15. – DOI: 10.1007/s13735-022-00251-8.

82. Aguero, M. Visualization of real-time displacement time history superimposed with dynamic experiments using wireless smart sensors and augmented reality / M. Aguero, D. Doyle, D. Mascarenas, F. Moreu // Earthquake Engineering and Engineering Vibration. – 2023. – Vol. 22. – № 3. – P. 573-588. – DOI: 10.1007/s11803-023-2184-x.

83. Ahad, Md.A.R. Action recognition by employing combined directional motion history and energy images / Md.A.R. Ahad, J. Tan, H. Kim, S. Ishikawa // IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition - Workshops. – San Francisco, CA, USA : IEEE, 2010. – P. 73-78. – DOI: 10.1109/CVPRW.2010.5543160.

84. Ahmadian, S. Maintenance and repairs system of automotive industry for sustainable internationalization / S. Ahmadian, T.T.Y. Alabdullah, I. Motaghian // International journal on advanced technology, engineering, and information system. – 2023. – Vol. 2. – № 2. – P. 106-123. – DOI: 10.55047/ijateis.v2i2.804.

85. Alarcón, M. Energy and maintenance management systems in the context of

industry 4.0. Implementation in a real case / M. Alarcón, F.M. Martínez-García, F.C. Gómez De León Hijes // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2021. – Vol. 142. – P. 110841. – DOI: 10.1016/j.rser.2021.110841.

86. Ali, S.S. Effort Estimation Problems in Software Maintenance – A Survey / S.S. Ali, M. Shoaib Zafar, M.T. Saeed. – [Electronic resource] // 3rd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET). – Sukkur, Pakistan : IEEE, 2020. – P. 1-9. – DOI: 10.1109/iCoMET48670.2020.9073823. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9073823/> (date of access: 23.04.2023).

87. AlMousa, M. NLP-Enriched Automatic Video Segmentation / M. AlMousa, R. Benlamri, R. Khoury. – [Electronic resource] // 6th International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS). – Rabat, Morocco : IEEE, 2018. – P. 1-6. – DOI: 10.1109/ICMCS.2018.8525880. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8525880/> (date of access: 19.07.2023).

88. Angelopoulos, J. An Intelligent Product Service System for Adaptive Maintenance of Engineered-to-Order Manufacturing Equipment Assisted by Augmented Reality / J. Angelopoulos, D. Mourtzis // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12. – № 11. – P. 5349. – DOI: 10.3390/app12115349.

89. Ansar, H. Hand Gesture Recognition Based on Auto-Landmark Localization and Reweighted Genetic Algorithm for Healthcare Muscle Activities / H. Ansar, A. Jalal, M. Gochoo, K. Kim // Sustainability. – 2021. – Vol. 13. – № 5. – P. 2961. – DOI: 10.3390/su13052961.

90. Arnab, A. ViViT: A Video Vision Transformer / A. Arnab, M. Dehghani, G. Heigold et al. – [Electronic resource] // IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). – Montreal, QC, Canada : IEEE, 2021. – ViViT. – P. 6816-6826. – DOI: 10.1109/ICCV48922.2021.00676. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9710415/> (date of access: 03.04.2025).

91. Azeroual, A. On-Line Key Frame Extraction and Video Boundary Detection Using Mixed Scales Wavelets and SVD / A. Azeroual, A. Karim, M. El Hajji, D. Hassan // International journal of circuits, systems and signal processing. – 2015. – Vol. 9. –

P. 420-426.

92. Bartusiak, R.D. Open Process Automation: A standards-based, open, secure, interoperable process control architecture / R.D. Bartusiak, S. Bitar, D.L. DeBari et al. // *Control Engineering Practice*. – 2022. – Vol. 121. – Open Process Automation. – P. 105034. – DOI: 10.1016/j.conengprac.2021.105034.

93. Benoughidene Abdel Halim. Shot Boundary Detection: Fundamental Concepts and Survey / Benoughidene Abdel Halim, Titouna Faiza // *Conference on Innovative Trends in Computer Science*. – 2019. – P. 34-40.

94. Beregi, R. Manufacturing Execution System Integration through the Standardization of a Common Service Model for Cyber-Physical Production Systems / R. Beregi, G. Pedone, B. Háy, J. Váncza // *Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 11. – № 16. – P. 7581. – DOI: 10.3390/app11167581.

95. Bertasius, G. Is Space-Time Attention All You Need for Video Understanding? / G. Bertasius, H. Wang, L. Torresani. – [Electronic resource] // *Proceedings of the 38th International Conference on Machine Learning*. – PMLR, 2021. – P. 813-824. – Mode of access: <https://proceedings.mlr.press/v139/bertasius21a.html> (date of access: 03.04.2025).

96. Bhattacharjya, D. Summary Markov Models for Event Sequences / D. Bhattacharjya, S. Sihag, O. Hassanzadeh, L. Bialik. – arXiv, 2022. – Mode of access: <http://arxiv.org/abs/2205.03375> (date of access: 19.07.2023). – [Electronic resource].

97. Brahmbhatt, S. ContactPose: A Dataset of Grasps with Object Contact and Hand Pose / S. Brahmbhatt, C. Tang, C.D. Twigg et al. – [Electronic resource] // *16th European Conference Computer Vision – ECCV 2020*. – Glasgow, UK : Springer International Publishing, 2020. – Vol. 13. – P. 361-378. – DOI: 10.1007/978-3-030-58601-0_22. – Mode of access: (date of access: 01.12.2024).

98. Bustos-Pulluquitin, S. Constrained Dynamic Matrix Control under International Electrotechnical Commission Standard 61499 and the Open Platform Communications Unified Architecture / S. Bustos-Pulluquitin, G. Caiza, M. Llumitasig-Galarza et al. // *Sensors*. – 2023. – Vol. 23. – № 15. – P. 6919. – DOI: 10.3390/s23156919.

99. Cabascango, V.E.Q. Automatic Control System for Thermal State of

Reverberatory Furnaces in Production of Nickel Alloys / V.E.Q. Cabascango, V.Yu. Bazin, S.A. Martynov, F.R.O. Pardo // *Metallurgist*. – 2022. – Vol. 66. – № 1-2. – P. 104-116. – DOI: 10.1007/s11015-022-01304-3.

100. Chasanis, V.T. Scene Detection in Videos Using Shot Clustering and Sequence Alignment / V.T. Chasanis, A.C. Likas, N.P. Galatsanos // *IEEE Transactions on Multimedia*. – 2009. – Vol. 11. – № 1. – P. 89-100. – DOI: 10.1109/TMM.2008.2008924.

101. Chaudhary, S. Deep network for human action recognition using Weber motion / S. Chaudhary, S. Murala // *Neurocomputing*. – 2019. – Vol. 367. – P. 207-216. – DOI: 10.1016/j.neucom.2019.08.031.

102. Chen, C. A Real-Time Human Action Recognition System Using Depth and Inertial Sensor Fusion / C. Chen, R. Jafari, N. Kehtarnavaz // *IEEE Sensors Journal*. – 2016. – Vol. 16. – № 3. – P. 773-781. – DOI: 10.1109/JSEN.2015.2487358.

103. Chen, C.-P. SARAS-Net: Scale and Relation Aware Siamese Network for Change Detection / C.-P. Chen, J.-W. Hsieh, P.-Y. Chen et al. // *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. – 2023. – Vol. 37. – № 12. – P. 14187-14195. – DOI: 10.1609/aaai.v37i12.26660.

104. Cheng, G. Advances in Human Action Recognition: A Survey. *Advances in Human Action Recognition* / G. Cheng, Y. Wan, A.N. Saudagar, et al. – arXiv, 2015. – DOI: 10.48550/arXiv.1501.05964. – Mode of access: <http://arxiv.org/abs/1501.05964> (date of access: 30.11.2024). – [Electronic resource].

105. Chunduru, V. Hand Tracking in 3D Space using MediaPipe and PnP Method for Intuitive Control of Virtual Globe / V. Chunduru, M. Roy, D.R.N. S, R.G. Chittawadigi. – [Electronic resource] // *IEEE 9th Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC)*. – Bangalore, India : IEEE, 2021. – P. 1-6. – DOI: 10.1109/R10-HTC53172.2021.9641587. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9641587> (date of access: 06.02.2024).

106. Dekleva, S.M. The Influence of the Information Systems Development Approach on Maintenance / S.M. Dekleva // *MIS Quarterly*. – 1992. – Vol. 16. – № 3. – P. 355-372. – DOI: 10.2307/249533.

107. Enterprise Asset Management. – Mode of access: <https://www.tadviser.ru/index.php/EAM?cache=no&ptype=otr#ttop> (date of access: 08.02.2025). – [Electronic resource].

108. Fang, J. Augmented Reality Platform for the Unmanned Mining Process in Underground Mines / J. Fang, C. Fan, F. Wang, D. Bai // Mining, Metallurgy & Exploration. – 2022. – Vol. 39. – № 2. – P. 385-395. – DOI: 10.1007/s42461-021-00537-1.

109. Feichtenhofer, C. SlowFast Networks for Video Recognition / C. Feichtenhofer, H. Fan, J. Malik, K. He. – [Electronic resource] // IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). – Seoul, Korea (South) : IEEE, 2019. – P. 6201-6210. – DOI: 10.1109/ICCV.2019.00630. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9008780/> (date of access: 05.03.2025).

110. Feichtenhofer, C. X3D: Expanding Architectures for Efficient Video Recognition / C. Feichtenhofer. – [Electronic resource] // IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – Seattle, WA, USA : IEEE, 2020. – X3D. – P. 200-210. – DOI: 10.1109/CVPR42600.2020.00028. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9156381/> (date of access: 05.03.2025).

111. Frandsen, J. An augmented reality maintenance assistant with real-time quality inspection on handheld mobile devices / J. Frandsen, J. Tenny, W. Frandsen, Y. Hovanski // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2023. – Vol. 125. – № 9. – P. 4253-4270. – DOI: 10.1007/s00170-023-10978-1.

112. Gangsar, P. Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A state-of-the-art review / P. Gangsar, R. Tiwari // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2020. – Vol. 144. – P. 106908. – DOI: 10.1016/j.ymssp.2020.106908.

113. Garcia-Hernando, G. First-Person Hand Action Benchmark with RGB-D Videos and 3D Hand Pose Annotations / G. Garcia-Hernando, S. Yuan, S. Baek, T.-K. Kim. – [Electronic resource] // IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – Salt Lake City, UT, USA : IEEE, 2018. – P. 409-419. – DOI: 10.1109/CVPR.2018.00050. – Mode of access: <http://arxiv.org/abs/1704.02463> (date of

access: 01.12.2024).

114. Gauch, J.M. Real time video scene detection and classification / J.M. Gauch, S. Gauch, S. Bouix, X. Zhu // *Information Processing & Management*. – 1999. – Vol. 35. – № 3. – P. 381-400. – DOI: 10.1016/S0306-4573(98)00067-3.

115. González, C. Advanced teleoperation and control system for industrial robots based on augmented virtuality and haptic feedback / C. González, J.E. Solanes, A. Muñoz et al. // *Journal of Manufacturing Systems*. – 2021. – Vol. 59. – P. 283-298. – DOI: 10.1016/j.jmsy.2021.02.013.

116. Guo, E. Learning to Measure Change: Fully Convolutional Siamese Metric Networks for Scene Change Detection. Learning to Measure Change / E. Guo, X. Fu, J. Zhu, et al. – arXiv, 2018. – Mode of access: <http://arxiv.org/abs/1810.09111> (date of access: 19.07.2023). – [Electronic resource].

117. Hampali, S. HOnnotate: A method for 3D Annotation of Hand and Object Poses / S. Hampali, M. Rad, M. Oberweger, V. Lepetit. – [Electronic resource] // *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. – Seattle, WA, USA : IEEE, 2020. – P. 3193-3203. – DOI: 10.1109/CVPR42600.2020.00326. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9157405> (date of access: 01.12.2024).

118. Hasson, Y. Learning joint reconstruction of hands and manipulated objects / Y. Hasson, G. Varol, D. Tzionas et al. – [Electronic resource] // *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. – Long Beach, CA, USA : IEEE, 2019. – P. 11799-11808. – DOI: 10.1109/CVPR.2019.01208. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8954029> (date of access: 01.12.2024).

119. Henderson, J. Implications of the Global Energy Transition on Russia / J. Henderson, T. Mitrova. – [Electronic resource] // *The Geopolitics of the Global Energy Transition : Lecture Notes in Energy* / M. Hafner, S. Tagliapietra eds. . – Springer International Publishing, 2020. – P. 93-114. – DOI: 10.1007/978-3-030-39066-2_5. – Mode of access: https://doi.org/10.1007/978-3-030-39066-2_5 (date of access: 23.04.2023).

120. Hsu, S.-H. Defect inspection of indoor components in buildings using deep

learning object detection and augmented reality / S.-H. Hsu, H.-T. Hung, Y.-Q. Lin, C.-M. Chang // Earthquake Engineering and Engineering Vibration. – 2023. – Vol. 22. – № 1. – P. 41-54. – DOI: 10.1007/s11803-023-2152-5.

121. Ioana, A. Approaching OPC UA Publish–Subscribe in the Context of UDP-Based Multi-Channel Communication and Image Transmission / A. Ioana, C. Burlacu, A. Korodi // Sensors. – 2021. – Vol. 21. – № 4. – P. 1296. – DOI: 10.3390/s21041296.

122. John Samuel, I. Defect-oriented supportive bridge inspection system featuring building information modeling and augmented reality / I. John Samuel, O. Salem, S. He // Innovative Infrastructure Solutions. – 2022. – Vol. 7. – № 4. – P. 247. – DOI: 10.1007/s41062-022-00847-3.

123. Jose, J. Efficient Shot Boundary Detection with Multiple Visual Representations / J. Jose, R. Soundrapandiyan, Dr.M. Ghalib et al. // Mobile Information Systems. – 2022. – Vol. 2022. – DOI: 10.1155/2022/4195905.

124. Khimraj. Human Activity Recognition using Accelerometer and Gyroscope Data from Smartphones / Khimraj, P.K. Shukla, A. Vijayvargiya, R. Kumar. – [Electronic resource] // International Conference on Emerging Trends in Communication, Control and Computing (ICONC3). – Lakshmangarh, India : IEEE, 2020. – P. 1-6. – DOI: 10.1109/ICONC345789.2020.9117456. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9117456> (date of access: 30.11.2024).

125. Klimova, A.S. Strategic Trends in Artificial Intelligence Through Impact of Computational Science: What Young Scientists Should Expect / A.S. Klimova, D.A. Nasonov, A.A. Hvatov et al. // Procedia Computer Science (см. В Книгах). – 2023. – Vol. 229. – P. 1-7. – DOI: 10.1016/j.procs.2023.12.001.

126. Kong, Y. Human Action Recognition and Prediction: A Survey / Y. Kong, Y. Fu // Tsinghua Science and Technology. – 2022. – Vol. 27. – № 6. – P. 973-1001. – DOI: 10.26599/TST.2021.9010068.

127. Koprov, P. Streaming Machine Generated Data via the MQTT Sparkplug B Protocol for Smart Factory Operations : 50th SME North American Manufacturing Research Conference (NAMRC 50,2022) / P. Koprov, A. Ramachandran, Y.-S. Lee et al. // Manufacturing Letters. – 2022. – Vol. 33. – P. 66-73. – DOI:

10.1016/j.mfglet.2022.07.016.

128. Koteleva, N. Augmented reality system and maintenance of electromechanical equipment in industrial production / N. Koteleva, K. Bekenev, **V. Valnev** // Youth Technical Sessions Proceedings- Proceedings of the 6th Youth Forum of the World Petroleum Council- Future Leaders Forum. – 2019. – P. 156-163. – DOI: 10.1201/9780429327070-22.

129. Koteleva, N. Augmented Reality System and Maintenance of Oil Pumps / N. Koteleva, G. Buslaev, **V. Valnev**, A. Kunshin. – [Electronic resource] // International Journal of Engineering. – 2020. – Vol. 33. – № 8. – DOI: 10.5829/ije.2020.33.08b.20. – Mode of access: http://www.ije.ir/article_108469.html (date of access: 14.07.2022).

130. Koteleva, N. Automatic Detection of Maintenance Scenarios for Equipment and Control Systems in Industry / N. Koteleva, **V. Valnev** // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13. – № 24. – P. 12997. – DOI: 10.3390/app132412997.

131. Koteleva, N. Investigation of the Effectiveness of an Augmented Reality and a Dynamic Simulation System Collaboration in Oil Pump Maintenance / N. Koteleva, **V. Valnev**, I. Frenkel // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12. – № 1. – P. 350. – DOI: 10.3390/app12010350.

132. Koteleva, N.I. Augmented reality as a means of metallurgical equipment servicing / N.I. Koteleva, **V.V. Valnev**, N.A. Korolev // Tsvetnye Metally. – 2023. – № 4. – P. 14-23. – DOI: 10.17580/tsm.2023.04.02.

133. Koteleva, N.I. Augmented reality technology as a tool to improve the efficiency of maintenance and analytics of the operation of electromechanical equipment / N.I. Koteleva, Y.L. Zhukovskiy, **V. Valnev** // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1753. – № 1. – P. 012058. – DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012058.

134. Kwon, T. H2O: Two Hands Manipulating Objects for First Person Interaction Recognition / T. Kwon, B. Tekin, J. Stuhmer et al. – [Electronic resource] // IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). – Montreal, QC, Canada : IEEE, 2021. – P. 10118-10128. – DOI: 10.1109/ICCV48922.2021.00998. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9711097> (date of access: 01.12.2024).

135. Lee, M.-H. Video scene change detection using neural network: Improved

ART2 / M.-H. Lee, H.-W. Yoo, D.-S. Jang // Expert Systems with Applications. – 2006. – Vol. 31. – Video scene change detection using neural network. – № 1. – P. 13-25. – DOI: 10.1016/j.eswa.2005.09.031.

136. Lee, S.-W. Fast scene change detection using direct feature extraction from MPEG compressed videos / S.-W. Lee, Y.-M. Kim, S.W. Choi // IEEE Transactions on multimedia. – 2000. – Vol. 2. – № 4. – P. 240-254.

137. Li, S. Hand Pose Estimation for Hand-Object Interaction Cases using Augmented Autoencoder / S. Li, H. Wang, D. Lee. – [Electronic resource] // International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – Paris, France : IEEE, 2020. – P. 993-999. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9197299/> (date of access: 27.02.2023).

138. Ma, J. Hand-Object Interaction Reasoning / J. Ma, D. Damen. – [Electronic resource] // 18th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS). – Madrid, Spain : IEEE, 2022. – P. 1-8. – DOI: 10.1109/AVSS56176.2022.9959207. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9959207> (date of access: 27.02.2023).

139. Maffei, A. Dynamic Mixed Reality Assembly Guidance Using Optical Recognition Methods / A. Maffei, M. Dalle Mura, F.M. Monetti, E. Boffa // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13. – № 3. – P. 1760. – DOI: 10.3390/app13031760.

140. Marino, E. An Augmented Reality inspection tool to support workers in Industry 4.0 environments / E. Marino, L. Barbieri, B. Colacino et al. // Computers in Industry. – 2021. – Vol. 127. – P. 103412. – DOI: 10.1016/j.compind.2021.103412.

141. Masum, A.K.M. Human Activity Recognition Using Accelerometer, Gyroscope and Magnetometer Sensors: Deep Neural Network Approaches / A.K.M. Masum, E.H. Bahadur, A. Shan-A-Alahi et al. – [Electronic resource] // 10th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT). – Kanpur, India : IEEE, 2019. – P. 1-6. – DOI: 10.1109/ICCCNT45670.2019.8944512. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8944512> (date of access: 30.11.2024).

142. Meth, H. The state of the art in automated requirements elicitation / H. Meth,

M. Brhel, A. Maedche // Information and Software Technology. – 2013. – Vol. 55. – № 10. – P. 1695-1709. – DOI: 10.1016/j.infsof.2013.03.008.

143. Mohd Noor, H. Computerized Maintenance Management System in IR4.0 Adaptation - A State of Implementation Review and Perspective / H. Mohd Noor, S.A. Mazlan, A. Amrin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1051. – № 1. – P. 012019. – DOI: 10.1088/1757-899X/1051/1/012019.

144. Mueller, F. Real-Time Hand Tracking Under Occlusion From an Egocentric RGB-D Sensor / F. Mueller, D. Mehta, O. Sotnychenko et al. – [Electronic resource] // Proceedings of International Conference on Computer Vision (ICCV). – Venice, Italy : IEEE, 2017. – P. 1154-1163. – DOI: 10.1109/ICCVW.2017.82. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8265363> (date of access: 30.11.2024).

145. Mun, J. BaSSL: Boundary-aware Self-Supervised Learning for Video Scene Segmentation / J. Mun, M. Shin, G. Han et al. // Computer Vision – ACCV 2022. Lecture Notes in Computer Science. – Springer, Cham, 2023. – Vol. 13844. – P. 485-501. – DOI: 10.1007/978-3-031-26316-3_29.

146. Nguyen, H.H. Optimization of the Control System for Electrolytic Copper Refining with Digital Twin During Dendritic Precipitation / H.H. Nguyen, V.Yu. Bazhin // Metallurgist. – 2023. – Vol. 67. – № 1-2. – P. 41-50. – DOI: 10.1007/s11015-023-01487-3.

147. Niemann, K.-H. The Next Generation: Ethernet-APL for Safety Systems: Contribution for the NAMUR annual general meeting 2022 / K.-H. Niemann, M. Risser // atp magazin. – 2023. – Vol. 65. – The Next Generation. – № 1-2. – P. 78-85. – DOI: 10.17560/atp.v65i1-2.2651.

148. Panchal, P. Scene detection and retrieval of video using motion vector and occurrence rate of shot boundaries / P. Panchal, S. Merchant, N. Patel. – [Electronic resource] // Nirma University International Conference on Engineering (NUICONE). – Ahmedabad, Gujarat, India : IEEE, 2012. – P. 1-6. – DOI: 10.1109/NUICONE.2012.6493257. – Mode of access: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6493257/> (date of access: 19.07.2023).

149. Raja Suguna, M. The Detection of Video Shot Transitions Based on Primary

Segments Using the Adaptive Threshold of Colour-Based Histogram Differences and Candidate Segments Using the SURF Feature Descriptor / M. Raja Suguna, A. Kalaivani, S. Anusuya // *Symmetry*. – 2022. – Vol. 14. – № 10. – P. 2041. – DOI: 10.3390/sym14102041.

150. Rao, A. A Local-to-Global Approach to Multi-modal Movie Scene Segmentation / A. Rao, L. Xu, Y. Xiong et al. – [Electronic resource] // *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* / arXiv:2004.02678 [cs]. – Seattle, WA, USA : IEEE, 2020. – P. 10143-10152. – DOI: 10.1109/CVPR42600.2020.01016. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9157529> (date of access: 19.07.2023).

151. Reda, H.T. Vulnerability and Impact Analysis of the IEC 61850 GOOSE Protocol in the Smart Grid / H.T. Reda, B. Ray, P. Peidaee et al. // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21. – № 4. – P. 1554. – DOI: 10.3390/s21041554.

152. Rotman, D. Optimally Grouped Deep Features Using Normalized Cost for Video Scene Detection / D. Rotman, D. Porat, G. Ashour, U. Barzelay // *ICMR '18: International Conference on Multimedia Retrieval*. – Yokohama, Japan : Association for Computing Machinery, 2018. – P. 187-195. – DOI: 10.1145/3206025.3206055.

153. Rotman, D. Robust and Efficient Video Scene Detection Using Optimal Sequential Grouping / D. Rotman, D. Porat, G. Ashour. – [Electronic resource] // *2016 IEEE International Symposium on Multimedia (ISM)*. – San Jose, CA, USA : IEEE, 2016. – P. 275-280. – DOI: 10.1109/ISM.2016.0061. – Mode of access: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7823628/> (date of access: 19.07.2023).

154. Rusin, A. Improving Equipment Reliability and System Maintenance and Repair Efficiency / A. Rusin, Y. Baryshev // *Civil Engineering Journal*. – 2019. – Vol. 5. – № 8. – P. 1799-1811.

155. Sakurada, K. Weakly Supervised Silhouette-based Semantic Scene Change Detection / K. Sakurada, M. Shibuya, W. Wang. – [Electronic resource] // *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. – Paris, France : IEEE, 2020. – P. 6861-6867. – DOI: 10.1109/ICRA40945.2020.9196985. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9196985> (date of access: 19.07.2023).

156. Sample: Hand Wash Dataset. – Mode of access: <https://www.kaggle.com/datasets/realtimear/hand-wash-dataset> (date of access: 07.12.2024). – [Electronic resource].

157. Sattarpanah Karganroudi, S. A novel assembly process guidance using augmented reality for a standalone hybrid energy system / S. Sattarpanah Karganroudi, R.E. Silva, Y. Chahdi El Ouazani et al. // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2022. – Vol. 122. – № 7. – P. 3425-3445. – DOI: 10.1007/s00170-022-10122-5.

158. Schiano Lo Moriello, R. On the Suitability of Augmented Reality for Safe Experiments on Radioactive Materials in Physics Educational Applications / R. Schiano Lo Moriello, A. Liccardo, F. Bonavolonta et al. // *IEEE Access*. – 2022. – Vol. 10. – P. 54185-54196. – DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3175869.

159. Schumann, M. Augmented Reality Support for Commissioning and Monitoring of Electromechanical Multipoint Die Cushion / M. Schumann, C. Kollatsch, H. Kirchner et al. // *Engineering Proceedings*. – 2022. – Vol. 26. – № 1. – P. 7. – DOI: 10.3390/engproc2022026007.

160. Sejdić, E. Time–frequency feature representation using energy concentration: An overview of recent advances / E. Sejdić, I. Djurović, J. Jiang // *Digital Signal Processing*. – 2009. – Vol. 19. – Time–frequency feature representation using energy concentration. – № 1. – P. 153-183. – DOI: 10.1016/j.dsp.2007.12.004.

161. Shan, D. Understanding Human Hands in Contact at Internet Scale / D. Shan, J. Geng, M. Shu, D.F. Fouhey. – [Electronic resource] // *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. – Seattle, WA, USA : IEEE, 2020. – P. 9866-9875. – DOI: 10.1109/CVPR42600.2020.00989. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9157473> (date of access: 01.12.2024).

162. Shou, Z. Online Detection of Action Start in Untrimmed, Streaming Videos / Z. Shou, J. Pan, J. Chan et al. – [Electronic resource] // *IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)* / arXiv:1802.06822 [cs]. – Seoul, Korea (South) : IEEE, 2019. – P. 5541-5550. – DOI: 10.1109/ICCV.2019.00564. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9008394> (date of access: 19.07.2023).

163. Shyr, W.-J. Development and Assessment of Augmented Reality Technology for Using in an Equipment Maintenance and Diagnostic System / W.-J. Shyr, C.-J. Tsai, C.-M. Lin, H.-M. Liao // Sustainability. – 2022. – Vol. 14. – № 19. – P. 12154. – DOI: 10.3390/su141912154.

164. Sidiropoulos, P. Temporal Video Segmentation to Scenes Using High-Level Audiovisual Features / P. Sidiropoulos, V. Mezaris, I. Kompatsiaris et al. // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2011. – Vol. 21. – № 8. – P. 1163-1177. – DOI: 10.1109/TCSVT.2011.2138830.

165. Singh, S. First Person Action Recognition Using Deep Learned Descriptors / S. Singh, C. Arora, C.V. Jawahar. – [Electronic resource] // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – Las Vegas, NV, USA : IEEE, 2016. – P. 2620-2628. – DOI: 10.1109/CVPR.2016.287. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7780656> (date of access: 01.12.2024).

166. Sun, R.Q. Exploration and Application of Cloud-Network Integration Control Architecture in Industry / R.Q. Sun, Y. Zhang, L. Liu et al. // Journal of Physics: Conference Series. – 2023. – Vol. 2589. – № 1. – P. 012021. – DOI: 10.1088/1742-6596/2589/1/012021.

167. Sun, Z. Human Action Recognition from Various Data Modalities: A Review / Z. Sun, Q. Ke, H. Rahmani et al. // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2022. – Vol. 45. – № 3. – P. 3200-3225. – DOI: 10.1109/TPAMI.2022.3183112.

168. Taheri, O. GRAB: A Dataset of Whole-Body Human Grasping of Objects. GRAB / O. Taheri, N. Ghorbani, M.J. Black, D. Tzionas arXiv:2008.11200. – arXiv, 2020. – DOI: 10.48550/arXiv.2008.11200. – Mode of access: <http://arxiv.org/abs/2008.11200> (date of access: 01.12.2024). – [Electronic resource].

169. Tong, Z. VideoMAE: Masked Autoencoders are Data-Efficient Learners for Self-Supervised Video Pre-Training / Z. Tong, Y. Song, J. Wang, L. Wang // Advances in neural information processing systems. – 2022. – Vol. 35. – P. 10078-10093.

170. Um, J. Low-cost mobile augmented reality service for building information modeling / J. Um, J. min Park, S. yeon Park, G. Yilmaz // Automation in Construction. –

2023. – Vol. 146. – P. 104662. – DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104662.

171. Ungurean, I. A Software Architecture for the Industrial Internet of Things—A Conceptual Model / I. Ungurean, N.C. Gaitan // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20. – № 19. – P. 5603. – DOI: 10.3390/s20195603.

172. Wagner, M. Mixed Reality or Simply Mobile? A Case Study on Enabling Less Skilled Workers to Perform Routine Maintenance Tasks : 4th International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing / M. Wagner, C. Leubner, J. Strunk // *Procedia Computer Science*. – 2023. – Vol. 217. – Mixed Reality or Simply Mobile? – P. 728-736. – DOI: 10.1016/j.procs.2022.12.269.

173. Wang, Q. Skeleton-Based ST-GCN for Human Action Recognition With Extended Skeleton Graph and Partitioning Strategy / Q. Wang, K. Zhang, M.A. Asghar // *IEEE Access*. – 2022. – Vol. 10. – P. 41403-41410. – DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3164711.

174. Wang, X. I3D-LSTM: A New Model for Human Action Recognition / X. Wang, Z. Miao, R. Zhang, S. Hao // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 569. – I3D-LSTM. – № 3. – P. 032035. – DOI: 10.1088/1757-899X/569/3/032035.

175. Wienker, M. The Computerized Maintenance Management System an Essential Tool for World Class Maintenance / M. Wienker, K. Henderson, J. Volkerts // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 138. – P. 413-420. – DOI: 10.1016/j.proeng.2016.02.100.

176. Wu, H. Scene Consistency Representation Learning for Video Scene Segmentation / H. Wu, K. Chen, Y. Luo et al. // *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. – New Orleans, LA, USA : IEEE, 2022. – P. 14001-14010. – DOI: 10.1109/CVPR52688.2022.01363.

177. Yao, B. Human action recognition by learning bases of action attributes and parts / B. Yao, X. Jiang, A. Khosla et al. – [Electronic resource] // *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*. – Barcelona, Spain : IEEE, 2011. – P. 1331-1338. – DOI: 10.1109/ICCV.2011.6126386. – Mode of access: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6126386/> (date of access: 30.11.2024).

178. Yun Zhai. Video scene segmentation using Markov chain Monte Carlo / Yun Zhai, M. Shah // IEEE Transactions on Multimedia. – 2006. – Vol. 8. – № 4. – P. 686-697. – DOI: 10.1109/TMM.2006.876299.
179. Zhang, F. MediaPipe Hands: On-device Real-time Hand Tracking / F. Zhang, V. Bazarevsky, A. Vakunov et al. // Workshop on Computer Vision for AR/VR. – 2020. – Vol. 2. – № 4. – P. 5. – DOI: 10.48550/arXiv.2006.10214.
180. Zhang, J. Motion Video Recognition in Speeded-Up Robust Features Tracking / J. Zhang, Y. Li, A. Tai et al. // Electronics. – 2022. – Vol. 11. – № 18. – P. 2959. – DOI: 10.3390/electronics11182959.
181. Zhang, X. Augmented Reality based Decision Support System in Coal Mine : 9th International Conference on Information Technology and Quantitative Management / X. Zhang, H. Wang, C. Zhang et al. // Procedia Computer Science. – 2022. – Vol. 214. – P. 892-897. – DOI: 10.1016/j.procs.2022.11.256.
182. Zhou, S. Video shot boundary detection based on multi-level features collaboration / S. Zhou, X. Wu, Y. Qi et al. // Signal, Image and Video Processing. – 2021. – Vol. 15. – DOI: 10.1007/s11760-020-01785-2.
183. Zhu, F. From handcrafted to learned representations for human action recognition: A survey / F. Zhu, L. Shao, J. Xie, Y. Fang // Image and Vision Computing. – 2016. – Vol. 55. – P. 42-52. – DOI: 10.1016/j.imavis.2016.06.007.
184. Zhukovskiy, Y.L. Induction Motor Bearing Fault Diagnosis Based on Singular Value Decomposition of the Stator Current / Y.L. Zhukovskiy, A.D. Buldysko, I.E. Revin // Energies. – 2023. – Vol. 16. – P. 3303. – DOI: 10.3390/en16083303.
185. Zhukovskiy, Y.L. Analysis of the behavior of asynchronous electric drive with a closed scalar control system when changing the inductance of the magnetizing circuit / Y.L. Zhukovskiy, B.Y. Vasilev, N.A. Korolev, Y.M. Malkova // Indonesian Journal of Science and Technology. – 2023. – Vol. 8. – № 1. – P. 65-78. – DOI: 10.17509/ijost.v8i1.51983.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2023680169

**Программа обнаружения действий персонала,
осуществляющего сервисное и оперативное
обслуживание АСУТП**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет» (RU)*

Авторы: *Котелева Наталья Ивановна (RU), Вальнев
Владислав Владимирович (RU)*

Заявка № **2023668862**
Дата поступления **14 сентября 2023 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **27 сентября 2023 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности



Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт о внедрении результатов диссертационного исследования в АО «Хакель»



Утверждаю
Генеральный директор АО «Хакель»
В.П. Вдов
М.П.
« 03 » 2024 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования
Вальнева Владислава Владимировича
по научной специальности 2.3.3 «Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами»

Рабочая комиссия в составе:

Председатель комиссии:

Генеральный директор АО «Хакель» Вдов Виктор Петрович;

Члены комиссии:

Заместитель генерального директора Марков Владимир Владимирович,

Главный инженер Митюгин Александр Андреевич,

Директор по производству Вислоух Егор Анатольевич.

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационного исследования на тему «Автоматизация процесса управления техническим обслуживанием и ремонтом промышленного оборудования на основе методов машинного обучения» рассмотрены рабочей комиссией и внедрены в производственную деятельность АО «Хакель» на линии сборки и монтажа устройств защиты от импульсных перенапряжений в виде:

– алгоритма идентификации производственных процессов сборки устройств защиты от импульсных перенапряжений.

Выписка из протокола заседания рабочей комиссии АО «Хакель» №171-5-А3/24 от 03.12.2024 г.



Использование указанных результатов позволяет автоматизировать контроль производственного процесса на линии сборки и монтажа устройств защиты от импульсных перенапряжений, снизить сроки исправления бракованных устройств, повысить эффективность в управлении производственными процессами на предприятии.

Председатель комиссии:

Генеральный директор
АО «Хакель»



Вдов В.П.

Члены комиссии:

Заместитель генерального директора



Марков В.В.

Директор по производству



Вислоух Е.А.

Главный инженер



Митюгин А.А.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Акт о внедрении результатов диссертационного исследования в АО «СоюзЦМА»



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

Союзцветметавтоматика им. Топчаева В.П.»

125504, Москва, Алтуфьевское шоссе, 79А стр.2

Тел.: (499) 489-10-85; Факс: (499) 489-14-05.

E-mail: scma@scma.ruАдрес в интернет: <http://www.scma.ru>

ОГРН 1037700048561

Утверждаю

Генеральный директор АО «СоюзЦМА»
А.В. Дёмин

«20» 03 2024 г.



АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования

Вальнева Владислава Владимировича

«Автоматизация процесса управления техническим обслуживанием и ремонтом промышленного оборудования на основе методов машинного обучения» по научной специальности 2.3.3 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами»

Комиссия НТС в составе:

Председатель комиссии:

– генеральный директор АО «СоюзЦМА», канд.техн.наук., Дёмин А.В.;

Члены комиссии:

- ученый секретарь НТС, канд.техн.наук., Мальцев Н.Е.,
- зав. сектором ТКФ по АСУ ТП, Соколов И.В.,
- Ведущий инженер лаборатории № 22, канд.техн.наук., Оксенгойт-Грузман Е.А.

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационного исследования на тему «Автоматизация процесса управления техническим обслуживанием и ремонтом промышленного оборудования на основе

исх. 105/571 от 15.10.2024

методов машинного обучения», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, внедрены в производственную деятельность, а именно использовались при разработке модульной системы управления насосно-аккумуляторными станциями гидравлических прессов в виде:

- технических решений по идентификации процессов при монтаже модульной системы управления насосно-аккумуляторными станциями гидравлических прессов.
- рекомендаций по способу контроля выполнения технического обслуживания шкафа управления и шкафа обработки данных и оценке продолжительности выполнения работ.

Выписка из протокола заседания Научно-технического совета АО «Союзцветметавтоматика им. Топчаева В.П.» №1/24 от 20.03.2024 г.

По результатам совместных разработок получено 0 патентов.

Использование указанных результатов позволит контролировать процесс монтажа и технического обслуживания в автоматическом режиме, что обеспечит повышение эффективности управления техническим обслуживанием и ремонтом, снизить затраты на проведение технического обслуживания и ремонта, повысить безопасность при монтаже устройств АСУ ТП.

Председатель комиссии:

Генеральный директор
АО «СоюзЦМА», к.т.н.



Дёмин А.В.

Члены комиссии:

Ученый секретарь НТС,
к.т.н.



Мальцев Н.Е.

Зав. сектором ТКФ по АСУ ТП



Соколов И.В.

Ведущий инженер лаборатории № 22,
к.т.н.



Оксенгойт-
Грузман Е.А.