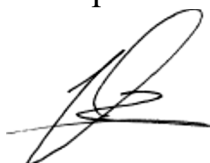


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет»

На правах рукописи

Жуковский Юрий Леонидович



ТЕОРИЯ, МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОЙ И
ЭФФЕКТИВНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО
ОБОРУДОВАНИЯ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ ГОРНЫХ И
НЕФТЕГАЗОВЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Том 1

Санкт-Петербург – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ**ТОМ 1**

ВВЕДЕНИЕ	8
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ГОРНЫХ И НЕФТЕГАЗОВЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ.....	19
1.1 Оценка состояния топливно-энергетического и минерально-сырьевого комплексов	19
1.2 Состав электромеханического оборудования на ГиГНП.....	26
1.3 Оценка технического состояния и уровня энергоэффективности в ЭТК МСК	29
1.4 Технологии энергосбережения средствами электрического привода.....	31
1.5 Виды конструкций двигателей и повреждений	33
1.5.1 Анализ факторов и статистики выхода из строя электромеханического оборудования.....	37
1.6 Мониторинг и диагностика технического состояния электромеханического оборудования	47
1.7 Анализ формирования временных и пространственных гармоник магнитного поля оборудования	59
1.8 Элементы интеллектуальной электроэнергетики и Индустрии 4.0 в ЭТК ТЭК и МСК.....	65
1.9 Цифровые технологии в управлении эксплуатацией электромеханического оборудования	73
1.10 Анализ перспектив развития цифровых двойников в ЭТК ГиНПП.....	81
1.10.1 Роль цифрового двойника в повышении безопасности и эффективности процессов.....	84

1.11	Применение средств искусственного интеллекта в системах управления жизненным циклом эксплуатации ЭМО.....	92
1.12	Концепция перехода к управлению жизненным циклом эксплуатации ЭМО на основе цифровых технологий.....	99
1.13	Выводы по главе 1.....	106
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА, ОБОБЩЕНИЕ И ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ		
ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ		
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ В СОСТАВЕ		
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ.....		
		109
2.1	Анализ потерь электроэнергии и мощности в ЭМО.....	110
2.2	Анализ влияния качества электрической энергии на АД.....	113
2.3	Влияние повреждений и качества электроэнергии на безопасность эксплуатации электромеханического оборудования.....	118
2.4	Влияние повреждений на энергетические характеристики электромеханического оборудования.....	122
2.5	Влияние потерь на срок службы.....	127
2.6	Анализ показателей качества электрической энергии.....	133
2.7	Анализ изменений потребляемой электрической мощности.....	137
2.7.1	Анализ поведения асинхронного электропривода при изменении параметров схемы замещения.....	144
2.7.2	По спектру потребляемой мощности.....	153
2.7.3	По анализу динамического коэффициента мощности и энергоресурса.....	157
2.8	По анализу электромагнитного момента.....	160
2.9	Комплексная диагностика электромеханического оборудования по электрическим сигналам.....	172
2.10	Выводы по главе 2.....	178

ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ..... 182

3.1 Обзор применения технологий искусственного интеллекта для процессов энергообеспечения и обеспечения надежного функционирования электромеханического оборудования	182
3.2 Алгоритм анализа спектра тока АД и формирования диагностических данных	191
3.3 Алгоритм оценки состояний	193
3.4 Способы и устройства диагностики электропривода переменного тока...	197
3.5 Способ управления режимами на основе нейросетевого диагностирования неисправностей и технического состояния электромеханического оборудования (ЭМО)	199
3.6 Метод оценки технического состояния по расчету вероятности возникновения дефекта.....	204
3.7 Нейросетевые алгоритмы определения группового состояния электропривода в узлах нагрузки	211
3.8 Моделирование узла нагрузки с группой электромеханического оборудования	213
3.9 Разработка программного датчика для обнаружения повреждения подшипника	224
3.10 Показатели и критерии технического состояния для программного датчика.....	227
3.11 Алгоритм поиска дефектов подшипников.....	231
3.12 Разработка алгоритма обнаружения повреждений на ранней стадии методом сингулярного разложения тока статора	237

3.13	Переход к предсказательной системе обслуживания и ремонта на основе интеллектуальных алгоритмов и методов	249
3.14	Выводы по главе 3	252

ТОМ 2

ГЛАВА 4	РАЗРАБОТКА КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	5
4.1	Электромеханическое оборудование как элемент цифрового двойника	5
4.2	Формирование архитектуры цифрового двойника.....	9
4.3	Архитектура цифрового двойника для управления безопасной и эффективной эксплуатацией в ЭТК ГиНГП.....	12
4.4	Классификация объемов данных и тяжести последствий аварий электромеханического оборудования	14
4.5	Анализ энергетических показателей и учёт взаимного влияния фактического состояния при формировании контуров управления цифровых двойников ЭТК ГиНГП	21
4.6	Определение подсистем и параметров для оценки взаимного влияния	25
4.7	Аналитические зависимости показателей энергоэффективности и надежности электромеханической подсистемы.....	31
4.8	Определение сценарных условий изменения электропотребления/электрических нагрузок от времени в изменяющихся условиях эксплуатации ЭТК ГиНГП	36
4.9	Сценарная оценка потерь электрической энергии на стадии эксплуатации жизненного цикла ЭМО	42
4.10	Оценка рисков и уровня потерь электрической энергии	46
4.11	Модель оценки стоимости жизненного цикла эксплуатации ЭМО.....	56

4.12	Оценка воздействия эксплуатации ЭМО в ЭТК на окружающую среду	58
4.13	Модель комплексного управления устойчивым развитием ЭТК МСК на основе сценарных условий.....	67
4.14	Моделирование влияния вызовов и цифровых технологий на износ энергетической инфраструктуры.....	80
4.15	Обобщенная карта определения технических воздействий.....	87
4.16	Выводы по главе 4.....	87
ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ СЕРВИСОВ УПРАВЛЕНИЯ		
ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ЭКСПЛУАТАЦИИ		
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ С УЧЕТОМ		
ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ.....		
		90
5.1	Анализ архитектур построения сервисов.....	90
5.2	Комплексная архитектура взаимодействия сервисов децентрализованной системы управления жизненным циклом эксплуатации ЭМО в ЭТК МСК.....	91
5.3	Сервисы анализа и прогноза энергопотребления.....	97
5.4	Разработка сервиса диагностики.....	99
5.4.1	Сервис прогнозирования развития дефектов.....	102
5.4.2	Разработка сервиса сбора первичных данных для анализа тока.....	103
5.4.3	Сервис управления ТОиР.....	105
5.5	Разработка сервиса для формирования синтетических данных параметров узла нагрузки.....	109
5.6	Разработка алгоритма управления спросом на электроэнергию ЭМО в ЭТК.....	120
5.7	Сервисы формирования цифровых моделей.....	127
5.8	Архитектура сервиса учета углеродного следа на основе распределенного реестра.....	129

5.9	Разработка сервиса дополненной реальности.....	133
5.10	Сервисы обнаружения и восполнения недостающих данных.....	139
5.11	Выводы по главе 5.....	142
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		144
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ		148
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ		161
ПРИЛОЖЕНИЕ А Технологические блоки необходимые для перехода к интеллектуальной энергетике		208
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности		227
ПРИЛОЖЕНИЕ В Акты внедрения результатов диссертационного исследования		251

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Электротехнические комплексы (ЭТК) горных и нефтегазовых предприятий (ГиНГП) являются ключевыми объектами энергетической инфраструктуры, которая, в свою очередь, является опорой энергетической безопасности страны. Однако из-за влияния множества факторов физический износ оборудования в ЭТК нарастает высокими темпами, что негативно сказывается на устойчивости функционирования ГиНГП, особенно на их показателях, связанных с экологичностью, безопасностью, экономической и энергетической эффективностью. Создание эффективных электротехнических комплексов ГиНГП имеет важное значение для обеспечения рационального потребления энергии.

В составе ЭТК ГиНГП широко используется электромеханическое оборудование (ЭМО), которое является ключевым звеном в появлении роботизированных и автономных производств, а также в освоении отдаленных территорий и переходе к электрифицированному транспорту. На долю электромеханической нагрузки приходится до 70% потребляемой электроэнергии ГиНГП. Повышение эффективности работы ЭМО играет существенную роль в снижении как потребления энергии, так и воздействия на окружающую среду ЭТК на этапе эксплуатации. Нарушения работы отдельных узлов, как систем автоматизированного электропривода (АЭП), так и других структурных элементов ЭТК, не обнаруженных своевременно, приводят к внезапным остановкам и тяжелым авариям на производстве, а также значительным потерям энергии и ресурсов, что, учитывая жизненный цикл эксплуатации оборудования в 20 и более лет, приводит к угрозе безопасной и эффективной добычи полезных ископаемых особенно при освоении труднодоступных территорий.

В условиях ГиНГП оборудование подвергается повышенной запылённости, влажности, резким перепадам температур, вибрации и другим факторам. Внезапные остановки и выход из строя ЭМО ставит под угрозу безопасность персонала и способно привести к техногенной катастрофе. Экономический ущерб от отказов обусловлен не только значительными расходами на ремонтные работы,

которые составляют до 80% стоимости оборудования, но и большими потерями от простоя оборудования при внезапных отказах ЭМО. Поэтому особо важны вопросы раннего обнаружения развивающихся дефектов без остановки работы оборудования и выявление аварийных и предаварийных режимов работы, а также неэффективного потребления энергии и экологического воздействия на этапе эксплуатации ЭМО.

Одними из значимых тенденций, обусловленных нарастающими технологическими, экологическими, экономическими и социальными вызовами для ГиНГП, являются переход на производственные предприятия в рамках концепции Индустрии 4.0 и цифровая трансформация, ориентированные на цифровое представление данных. В условиях роста стоимости и спроса на энергетические и минеральные ресурсы актуальным является поиск новых способов и средств мониторинга и диагностики, прогнозирования режимов работы и остаточного ресурса ЭМО в ЭТК ГиНГП. Поэтому перспективным направлением использования цифровых данных является переход к системе предсказательного технического обслуживания и ремонта (ПСТОиР) на основе новых способов диагностики, применения цифровых моделей и интеллектуальных алгоритмов.

Развитие интеллектуальных производственных систем на основе цифровых технологий позволяет построить систему управления жизненным циклом эксплуатации ЭМО как динамически управляемую систему и встраивать в неё различные интеллектуальные программные модули (цифровые сервисы). Интеграция данных на основе «цифрового двойника» открывает возможности повышения безопасности, энергоэффективности, экологичности и экономической эффективности эксплуатации ЭМО с учетом влияния множества влияющих факторов на всем протяжении использования оборудования в производстве. Отсутствие комплексных решений по применению цифровых технологий для ГиНГП, в части обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации ЭМО, определяет актуальность направления исследований, в том числе при рассмотрении ЭМО как ключевого звена в преобразовании и использовании энергии, а также как источника цифровых данных.

Поэтому направление развития теории и методов повышения безопасности и эффективности функционирования ЭМО в структуре ЭТК на основе комплексного применения цифровых технологий является важной частью стратегии устойчивого развития ГиНПП и обеспечения энергетической безопасности страны.

Степень разработанности темы исследования

Значительный вклад в изучение вопросов управления ТОиР и повышения надежности внесли многие ученые в том числе: Абрамович Б.Н., Назарычев А.Н., Иванов С.Л., Ключев В.В., Воропай Н.И., Таджибаев А.И., Гук Ю.Б., Мелентьев Л.А., Бурков В.Н., Мясников А.В., Беляев Ю.К., Шишлянников Д.И. Вопросам испытаний, оценки остаточного ресурса и диагностики электрических машин посвящены работы Гольдберга О.Д., Котеленец Н.Ф., Русова В.А., Муравлева О.П., Глебова И.А., Никиян Н.Г., Кузнецова Н.Л., Осипова О.И., Bonnett A.H., Habetler T.G. и др.

Повышением эффективности функционирования электротехнических комплексов и разработкой систем управления электромеханического оборудования занимались: Саушев А.В., Анучин А.С., Шклярский Я.Э., Ляхомский А.В., Петроченков А.Б., Крюков О.В., Васильев Б.Ю. Вклад в разработку методик диагностирования АД по потребляемому току статора внесли: Козярук А.Е., Баширов М.Г., Рогачев В.А., Вейнреб К.Б., Cardoso A.J., Thomson W.T.

Развитию методов прогнозирования, разложения временных рядов и интеллектуальным алгоритмам обработки данных посвящено множество трудов Голяндиной Н.Е., Кудрина Б.И., Макоклюева И.Б., Котелевой Н.И., Zhao X.

Цель работы

Обеспечение безопасной и эффективной эксплуатации электромеханического оборудования в электротехнических комплексах горных и нефтегазовых предприятий на основе управления его техническим состоянием, путем развития теории, обоснования методов и средств с практическим подтверждением на основе цифровых технологий.

Идея работы

Для повышения безопасности и эффективности эксплуатации электромеханического оборудования необходимо разработать методы и средства, позволяющие перейти к модели управления жизненным циклом эксплуатации с комплексным использованием цифровых технологий.

Задачи исследования

1. Проанализировать текущее состояние и перспективы развития ЭТК ГиНГП. Проанализировать безопасность и эффективность эксплуатации ЭМО в составе ЭТК ГиНГП, выявить основные факторы снижения срока службы и наработки на отказ при эксплуатации.

2. Провести критический анализ существующих и перспективных методов диагностики технического состояния, оценки и прогнозирования остаточного ресурса электромеханического оборудования в ЭТК ГиНГП.

3. Разработать методы, позволяющие использовать математические модели электромеханического оборудования, эксплуатационные данные, диагностические признаки и результаты мониторинга для выявления режимов работы, наличия развивающихся дефектов на ранней стадии, а также прогнозирования технического состояния. Разработать методологию диагностики ЭМО позволяющую выполнять диагностику и оценку остаточного ресурса без остановки и вывода из эксплуатации ЭМО на основе многофакторного анализа диагностических параметров и признаков.

4. Разработать комплекс алгоритмов обработки эксплуатационных данных и диагностических признаков на основе цифровых технологий для определения вида повреждения и классификации режимов работы ЭМО в ЭТК, позволяющих перейти к ПСТОиР и повысить безопасность и эффективность эксплуатации ЭМО в составе ЭТК ГиНГП.

5. Определить критерии управления, параметры мониторинга и математические модели, необходимые для управления безопасным и эффективным функционированием ЭМО на протяжении всего жизненного цикла эксплуатации в ЭТК ГиНГП.

6. Обосновать архитектуры систем сбора и обработки первичных данных для извлечения диагностических признаков с учетом классификации режимов работы и дефектов для реализации управления жизненным циклом эксплуатации ЭМО в составе ЭТК ГиНГП.

7. Разработать методологию построения архитектуры цифрового двойника управления техническими воздействиями на этапе жизненного цикла эксплуатации ЭМО в ЭТК ГиНГП с учетом экономической эффективности, потерь энергии и вредных выбросов на жизненном цикле эксплуатации.

8. Провести экспериментальную проверку разработанных методов, алгоритмов и программных комплексов.

Объект исследования

Объектом исследований диссертационной работы является электромеханическое оборудование в электротехнических комплексах ГиНГП как сложная система, стремящаяся сохранить энергетическую, экономическую и экологическую эффективность в течение жизненного цикла эксплуатации.

Предмет исследования

Методы и средства обеспечения безопасности и эффективности эксплуатации, мониторинг, диагностика и оценка технического состояния электромеханического оборудования.

Научная новизна

1. Определены факторы снижения наработки на отказ, а также выявлены закономерности изменения показателей эффективности работы ЭМО от вида и степени повреждения, установлено влияние роста потерь электрической энергии на сокращение срока службы, что необходимо учитывать при оценке влияния на безопасность и эффективность функционирования ЭМО в ЭТК ГиНГП.

2. Разработана методология выполнения диагностики и оценки остаточного ресурса без остановки и вывода из эксплуатации ЭМО на основе многофакторного анализа его эксплуатационных электрических параметров. В качестве показателя технического состояния используется коэффициент изменения потерь в элементах ЭТК, равный разнице относительных потребляемых ЭМО

мощностей при определенной величине нагрузки, а также приведенная величина потерь в агрегате за время до перехода его в предельное состояние, в котором дальнейшая эксплуатация ЭМО невозможна.

3. Предложены комплексные диагностические признаки, позволяющие отслеживать и прогнозировать динамику изменения остаточного ресурса ЭМО при различных параметрах, переменных режимах работы и флуктуации внешних и эксплуатационных факторов ЭТК ГиНГП, на основе интеграции информации об эталонных состояниях, а также предложенных диагностических признаков, извлекаемых из электрических сигналов без остановки технологического процесса.

4. Разработан комплекс алгоритмов обработки эксплуатационных данных и диагностических признаков на основе средств искусственного интеллекта для определения вида повреждения и классификации режимов работы ЭМО в ЭТК, позволяющий перейти к предсказательной системе технического обслуживания и ремонта для повышения безопасности и эффективности эксплуатации ЭМО.

5. Обоснована структура и методология функционирования цифрового двойника процесса управления техническими воздействиями на жизненном цикле эксплуатации ЭМО в составе ЭТК ГиНГП, отличающаяся учетом дополнительных потерь электроэнергии и воздействия на окружающую среду обусловленных наличием дефектов ЭМО.

6. Обоснована комплексная взаимосвязанная структура программных модулей и разработаны алгоритмы их функционирования в составе распределенной системы управления жизненным циклом эксплуатации ЭМО с учетом классификации первичной информации, ранжирования сценариев обмена данными, уровня тяжести последствий аварий и цифровизации ЭТК ГиНГП.

Теоретическая и практическая значимость работы

– Предложены технические решения и алгоритмы, повышающие достоверность выявления дефектов, что повышает эффективность процедуры технической диагностики применительно к ЭМО.

– Разработано алгоритмическое и программное обеспечение для выявления вида и уровня дефектов, предназначенное именно для

электромеханического оборудования ЭТК ГиНПП, с учетом специфики процессов в них происходящих.

– Разработана методика выбора структуры и архитектуры алгоритмов, применяемых для извлечения диагностической информации и прогнозирования развития уровней дефектов в системе управления жизненным циклом эксплуатации ЭМО.

– Разработаны архитектуры построения цифровых двойников для интеграции в интеллектуальные ЭТК с целью управления энергоэффективностью и экологичностью на протяжении жизненного цикла эксплуатации ЭМО.

– Созданы лабораторные стенды и программное обеспечение, используемые в учебном процессе в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» при обучении студентов и проведении курсов повышения квалификации.

– Получены акты внедрения: ООО «АВТОТЕХИНМАШ» (акт утвержден 20.06.2023 г.); СЗФО АО «МЦД» (акт утвержден 20.06.2023 г.); ООО «НПП «КИТ» (акт утвержден 30.05.2023 г.); федеральное государственного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (акт утвержден 05.07.2023 г.); АО «Гипроцветмет» (акт утвержден 16.06.2023 г.); ООО «Севзаптехника» (акт утвержден 08.06.2023 г.). АО «Готэк Северо-Запад» (акт утвержден 25.05.2023 г.); ПРИЛОЖЕНИЕ В.

Методология и методы исследований

Решение поставленных в работе задач осуществлялось путем анализа и обобщения данных, статистических методов обработки данных, методов численного анализа, теории обобщённой электрической машины, теории электропривода, теории временных рядов, методов машинного обучения. При разработке и исследовании диагностических методов, моделей и алгоритмов использованы методы идентификации, компьютерного моделирования, программирования, теории нейронных сетей. Аналитические исследования проведены на ЭВМ, а экспериментальные – на реальных объектах и на физическом оборудовании лаборатории «интеллектуального управления и энергообеспечения» Образовательного центра цифровых технологий Горного университета.

Положения, выносимые на защиту

1. Интеграция информации о режимах работы, эталонных параметрах, диагностических признаках, извлекаемых из электрических сигналов без остановки технологического процесса, позволяет существенно повысить эффективность диагностики электромеханического оборудования в электротехнических комплексах.

2. Комплекс методов и алгоритмов обработки эксплуатационных данных, диагностических признаков, результатов мониторинга, оценки вероятности наличия дефекта и прогнозирования уровня развития дефектов позволяют перейти к предсказательной системе обслуживания и ремонта для повышения безопасности и эффективности эксплуатации электромеханического оборудования.

3. Применение концептуальной модели цифрового двойника процесса управления техническими воздействиями, ориентированного на учёт взаимного влияния фактического состояния и энергетических потоков структурных элементов электротехнических комплексов, учитывающего сценарные условия их функционирования, позволит комплексно оценивать уровень потерь электроэнергии и вредных выбросов, электромеханического оборудования в процессе эксплуатации с учетом его технического состояния.

4. Комплекс взаимосвязанных программных модулей и алгоритмов функционирования в составе системы управления жизненным циклом эксплуатации электромеханического оборудования, позволяющей повысить надежность, экономическую, энергетическую и экологическую эффективность электротехнических комплексов.

Степень достоверности результатов исследования основывается на корректном применении общепризнанных теорий, методов и подходов, адекватных математических моделей электрических машин и силовых преобразователей, имитационном, динамическом и численном моделировании, сходимости результатов моделирования и экспериментальных исследований. Полученные результаты исследований согласуются с аналогичными результатами отечественных и зарубежных авторов.

Апробация результатов

Основные положения и результаты работы докладывались и получили положительную оценку на конференциях:

1. The 9th International Conference on Energy, Resources, Environment and Sustainable Development (ERESD 2022) (май 2022 года, г. Сюйчжоу, КНР). Тема доклада: «Life cycle management of electromechanical equipment based on digital technologies».

2. Международная научно-практическая конференция «Проблемы территориального развития арктической зоны и пути их решения» (ARCTD 2021) (сентябрь 2021 года, г. Санкт-Петербург). Тема доклада: «Цифровая энергетика как основа устойчивого развития Арктического региона»

3. IV Международная научно-практическая конференция «Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование», (октябрь 2021 года, г. Санкт-Петербург). Тема доклада: «Устойчивое развитие минерально-сырьевого комплекса на основе цифровых технологий».

4. 3-я Международная научная конференция «Устойчивое и эффективное использование энергии, воды и природных ресурсов» (апрель 2021 года, г. Санкт-Петербург). Тема доклада: «Роль цифровых технологий в энергосбережении на горном производстве».

5. International Scientific Electric Power Conference ISEPC-2019 (май 2019 года, г. Санкт-Петербург). Тема доклада: «Problems of diagnostics of asynchronous motor powered by an autonomous voltage inverter».

6. Международная научно-практическая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2018», 2018 г., г. Санкт-Петербург. Тема доклада: «Диагностические параметры асинхронного электропривода на основе вектора парка».

7. Международная научная конференция «Энерго-ресурсоэффективность в интересах устойчивого развития». (ноябрь 2018 года, г. Томск). Тема доклада: «Влияние технологических изменений в сфере энергоэффективности на износ инфраструктуры в топливно-энергетическом комплексе».

8. Международная научно-техническая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2017», 2017 г., г. Санкт-Петербург. Тема доклада: «Применение технологии промышленного интернета вещей для управления жизненным циклом электромеханического оборудования».

9. Международная научно-практическая конференция «Горная электромеханика – 2017: проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного и нефтепромыслового оборудования» (октябрь 2017 года, г. Пермь). Тема доклада: «Техническая диагностика и прогнозирование состояния электромеханического оборудования на основе технологии «Промышленного интернета вещей».

Личный вклад автора

Автором проведен анализ отечественной и зарубежной научной литературы, рассмотрены существующие и перспективные методы обнаружения дефектов, оценки и прогнозирования технического состояния, выбраны, обоснованы, организованы и спланированы теоретические, лабораторные исследования. Проведен анализ и обобщение результатов экспериментов, сформированы основные выводы по полученным данным. Разработаны алгоритмы мониторинга и прогнозирования вида и уровня дефектов ЭМО по диагностическим признакам. Предложены комплексные модели и показатели, позволяющие отслеживать и управлять техническими воздействиями с учетом изменения потерь. Разработана структура и алгоритмы функционирования распределенной системы управления

жизненным циклом электромеханического оборудования. Основные положения работы апробированы на конференциях.

Публикации

Основные научные результаты в достаточной степени освещены в 52 печатных работах (1, 4, 6, 18, 20, 78, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 98, 101, 105, 236, 237, 238, 239, 244, 245, 279, 322, 323, 324, 325, 336, 326, 327, 328, 329, 330, 331, 332, 333, 334, 335, 337, 338, 339, 340, 341), в том числе в 11 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, в 27 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 8 патентов на изобретение, 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, Приложение Б.

Структура диссертации

Диссертация состоит из 2 томов, введения, пяти глав, заключения, библиографического списка и списка сокращений и условных обозначений. Содержит 526 страниц машинописного текста, 204 рисунка, 77 таблиц, список литературы из 341 наименования и 3 приложений на 65 страницах.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность профессору кафедры электроэнергетики и электромеханики Горного университета Назарычеву А.Н. за поддержку и помощь в подготовке диссертационной работы.

Автор с благодарностью оценивает итоги совместной работы с доцентами Горного университета Котелевой Н.И., Королёвым Н.А. и ассистентом Бабановой И.С., а также выражает глубокую благодарность всем сотрудникам родной кафедры электроэнергетики и электромеханики и Образовательного центра цифровых технологий.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ГОРНЫХ И НЕФТЕГАЗОВЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

1.1 Оценка состояния топливно-энергетического и минерально-сырьевого комплексов

Существующие на сегодняшний день энергетические системы и комплексы активно развивались в эпоху второй промышленной революции вплоть до середины 20 века. В эпоху третьей промышленной революции топливно-энергетический комплекс (ТЭК) является наиболее консервативным элементом, сдерживающим национальные экономики [180, 202, 319]. Экономический рост и необходимость защиты окружающей среды на сегодняшний день определяют развитие ТЭК, учитывая его влияние на экологическую безопасность, энергоэффективность и устойчивое экономическое развитие в мире [306, 307].

Последние десятилетия характеризуются бурным развитием техники, экономики и общества, происходят кардинальные изменения (цифровые технологии, рост численности населения планеты, глобальное изменение климата и т.п.) [267], влияющие в том числе на горные и нефтегазовые предприятия (ГиНГП), предъявляя к ним все новые и новые требования.

К значительным изменениям социальной и экономической сферы, которые сказываются на развитии энергетики и, в частности, на ГиНГП, исследователи относят:

1. Растущий спрос на источники электрической энергии [284, 302, 336].
2. Возрастающие требования потребителей к бесперебойности, надежности и качеству электроснабжения [306, 307].
3. Общемировой рост стоимости электрической энергии и энергетических ресурсов [93, 229].
4. Стремительно нарастающий дефицит квалифицированных кадров в энергетической отрасли и их старение [173].

5. Внимание со стороны заинтересованных сторон к результатам деятельности компаний ТЭК [276, 284].

6. Соблюдение требований экологической и промышленной безопасности функционирования предприятий ТЭК [39].

7. Повышение ключевых показателей эффективности [232].

Спрос на структурные изменения в ТЭК определяются, факторами технологического прогресса, повышением требований потребителей при общесистемном снижении надежности, росте спроса в сфере энергоэффективности и экологической безопасности. При этом ужесточаются требования к экономичности, энергобезопасности, экологичности, энергоэффективности и адаптивности энергетической инфраструктуры [44, 231], однако износ энергетической инфраструктуры продолжает расти и средний показатель доли оборудования со сверхнормативным сроком службы в ТЭК достигает почти 30 % [161, 259, 260]. Такая техника постоянно находится в «предотказном» состоянии, что приводит к увеличению доли затрат на ее содержание в себестоимости продукции производства. В то же время предприятия при ликвидации техники ориентируются на ее физическую изношенность и не спешат вкладывать деньги в модернизацию и замену оборудования на более новое и энергоэффективное [81].

В развитых странах ухудшение энергетической инфраструктуры также остается актуальной проблемой и требует еще больших затрат на техническое обслуживание и восстановление средств из-за ухудшения среды обитания и антропогенного изменения климата [209, 291, 314]. Также продолжает расти износ основных фондов из-за недофинансирования программ реновации и отсутствия системного подхода к восстановлению материально-технической базы со стороны государства, при этом энергетическая инфраструктура является одним из самых недофинансируемых секторов инфраструктуры, поскольку обладает одним из самых больших инвестиционных разрывов после дорожной инфраструктуры на 2020 год (Рисунок 1.1.1) [279].

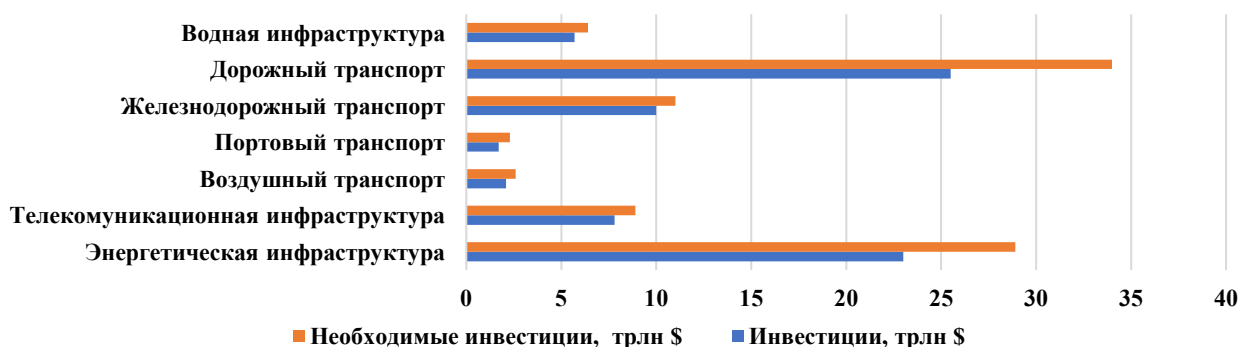


Рисунок 1.1.1 – Инвестиции в инфраструктуру в мире на 2020 г

Степень износа оборудования в энергетике является одной из самых масштабных составляющих в стареющей инфраструктуре. Ввод новых мощностей недостаточен для обеспечения роста потребности в электроэнергии и надежного стабильного электроснабжения потребителей при данном уровне потребления и прогнозируемого выпуска неэффективного оборудования. С каждым годом состояние основных фондов ухудшается. Данные о состоянии основных средств, темпах обновления и выбытия представлены на (Рисунок 1.1.2). Амортизация основных средств рассчитывается как отношение накопленного на конец года износа основных средств к общей учетной стоимости основных средств в тот же день.

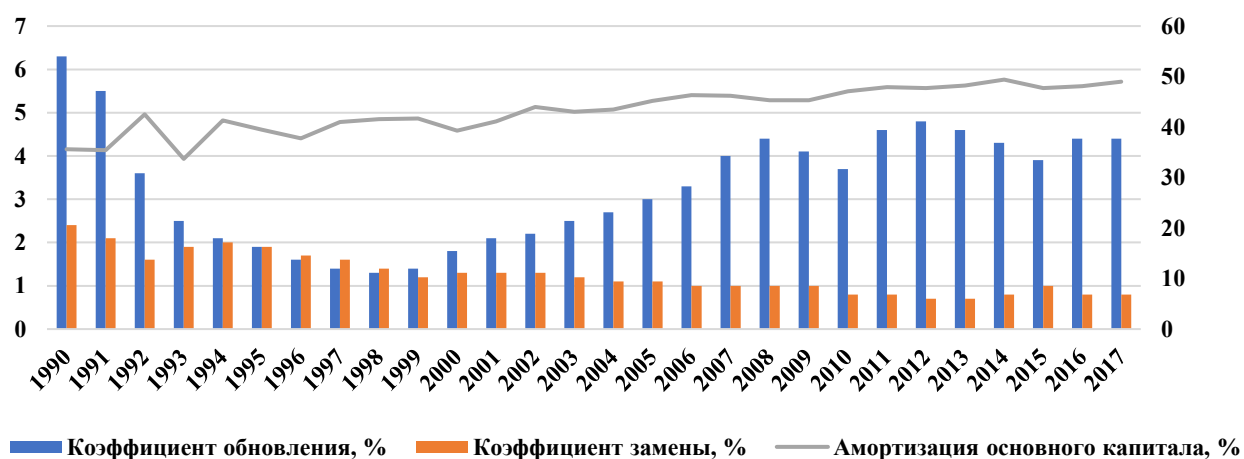


Рисунок 1.1.2 – Оценка состояния основных фондов Российской Федерации (1990-2017 гг.)

Пик развития энергетики в Российской Федерации пришелся на период с 1970 по 1985 год, а потребление электроэнергии активно растет с 1995 года (Рисунок 1.1.3).

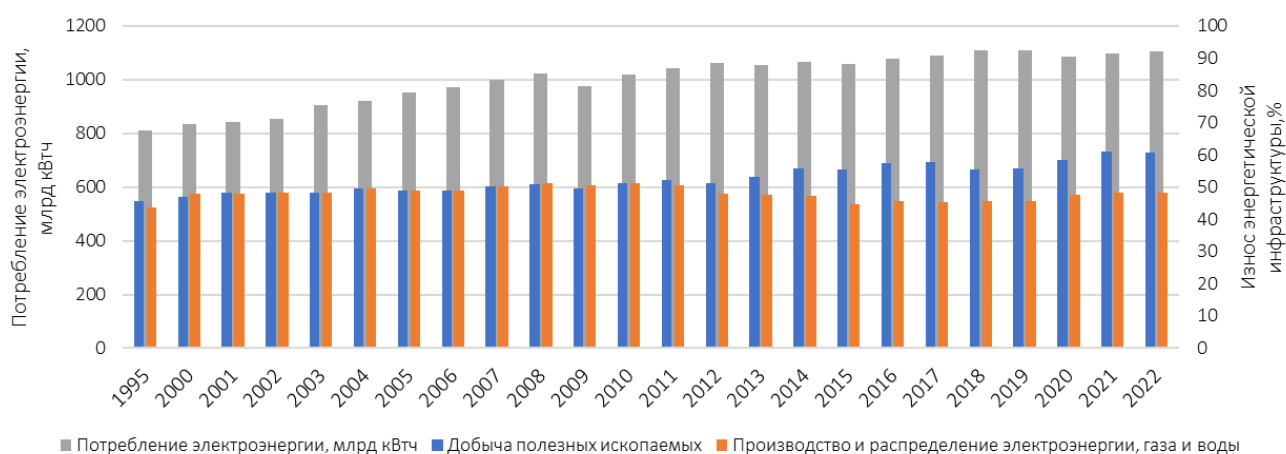


Рисунок 1.1.3 – Рост энергопотребления, добычи полезных ископаемых и износ энергетической инфраструктуры в Российской Федерации

Таким образом, к 2019 году износ оборудования в энергетике практически достиг критического максимума и приблизился к 65 %:

1. *Нефтегазовая отрасль* – 57 % износа инфраструктуры: требует более совершенных методов предотвращения аварий и своевременного проведения амортизационных работ (ремонт, замена, модернизация) [161].

2. *Системы электроснабжения* – 60 % изношенности инфраструктуры:

- высоковольтные линии и кабельные линии 0,38-20 кВ – 65 % износа;
- высоковольтные и кабельные линии 35-110 кВ – 60 % износа;
- более половины ЛЭП 0,38-110 кВ были спроектированы и построены более 40 лет назад [261].

Объекты электросетевого хозяйства распределены по уровню физического износа силовых трансформаторов в соотношении (в % от общего количества), (Рисунок 1.1.4).

В связи с этим снижается надежность и безопасность работы электрических сетей, зданий, сооружений, оборудования, устройств, систем управления и связи, увеличиваются риски возникновения аварийных ситуаций в электросетевом комплексе.

Кроме того, одним из основных показателей является потеря электроэнергии. Анализ структуры потерь показал, что общие потери электроэнергии в сетях 0,38-110 кВ колеблются от 10 до 15 %. Фактические потери в России составляют 130 млрд кВт·ч (13,6 % отпуска в сеть). Согласно Энергетической стратегии до 2035

года потери электроэнергии должны быть на уровне не более 8 % от отпуска в сеть, что свидетельствует о необходимости принятия технических и организационных мер, направленных на снижение потерь [259].

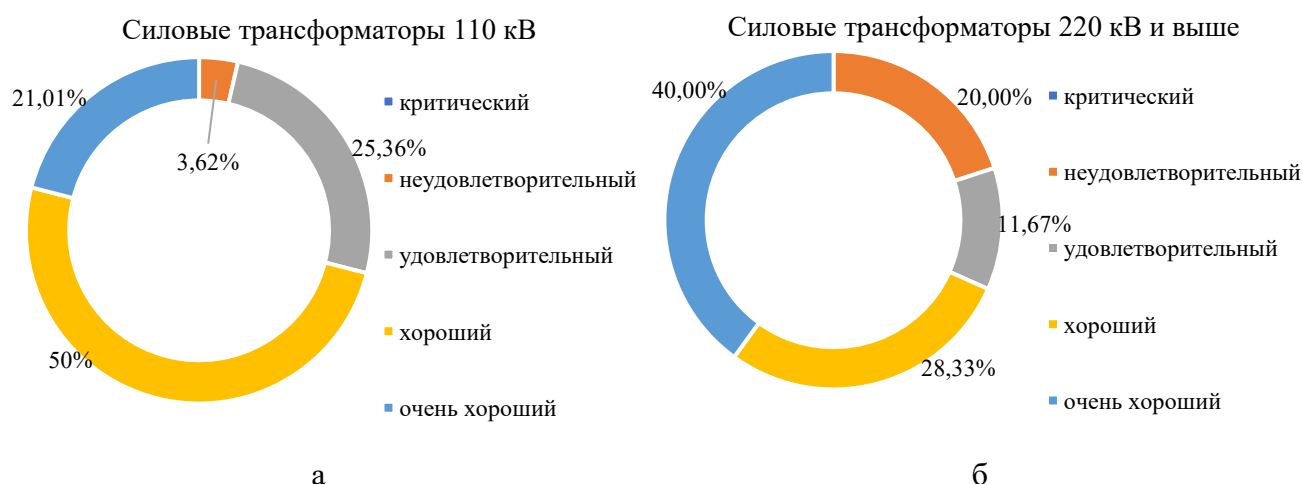


Рисунок 1.1.4 – Оценка уровня износа силовых трансформаторов: а – 110 кВ; б – 220 кВ и выше

Электрические сети распределены по степени физического износа ЛЭП в соотношении (в % от общего количества), (Рисунок 1.1.5).

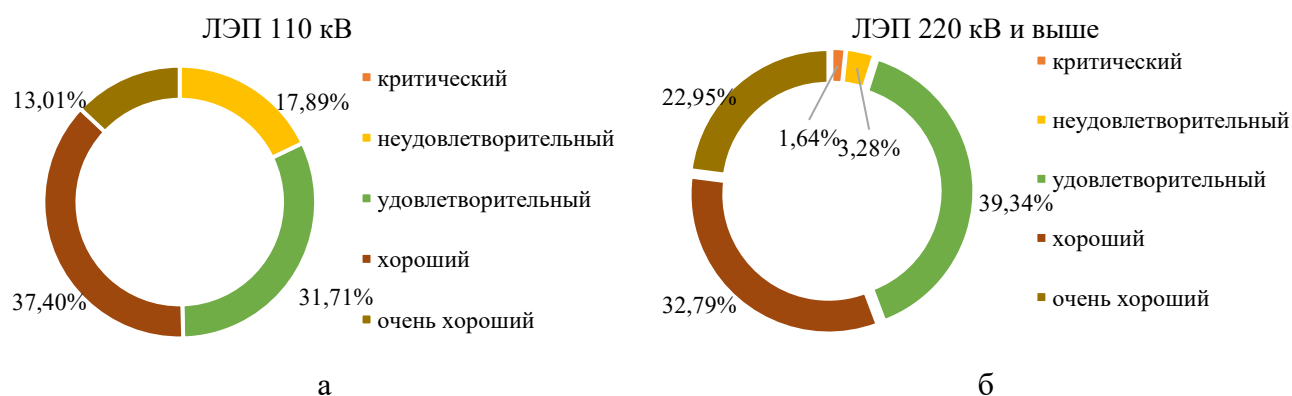


Рисунок 1.1.5 – Оценка уровня износа ЛЭП: а – 110 кВ; б – 220 кВ и выше

По оценке портала Global Infrastructure Hub [220] инвестиции в РФ на 2017 год составили 2,2 трлн рублей при необходимых вложениях 3,3 трлн. рублей – самый крупный инвестиционный разрыв в 41 % по сравнению с другими представленными регионами (Таблица 1.1.1). Ожидается, что к 2030 году инвестиции возрастут лишь на 15 %, но для покрытия расходов на реконструкцию отечественной инфраструктуры вложения должны увеличиться более чем в 1,7 раз и составить не менее 4,2 трлн рублей ежегодно. При прогнозируемом Всемирным Банком росте ВВП лишь на 1,7 % к 2025 году достижение необходимого уровня инвестиций за счет бюджетных средств является маловероятным. Если достичь

данных показателей не удастся, то по причине малых объемов капиталовложений в модернизацию инфраструктуры России общий процент износа мировой инфраструктуры может приблизиться к 62 % (Рисунок 1.1.6).

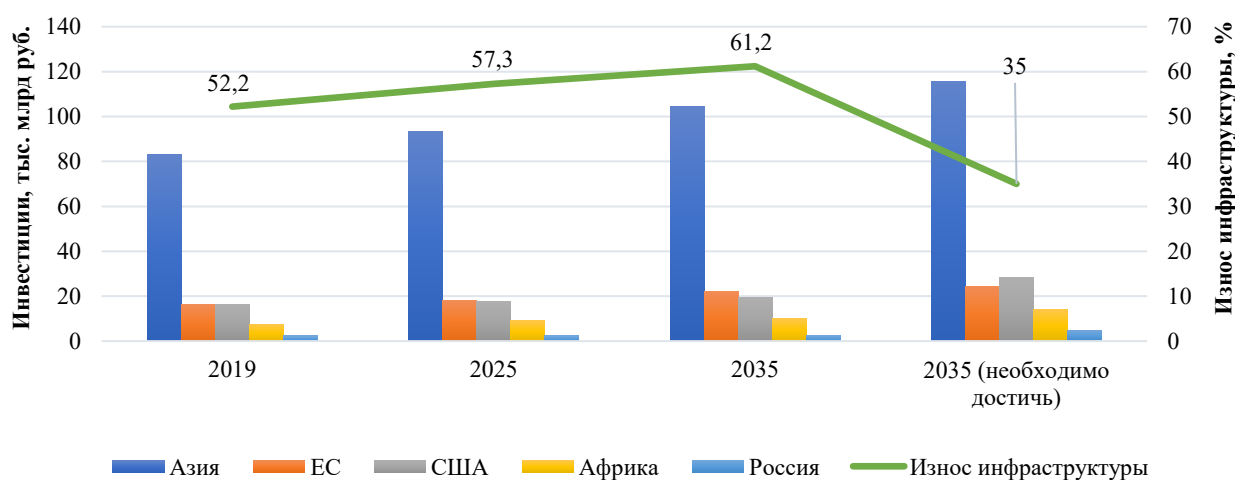


Рисунок 1.1.6 – Уровень износа инфраструктуры и инвестиции в различных регионах 2019-2035 гг.

Таблица 1.1.1 – Состояние мировой инфраструктуры до 2030 года

Регион	Износ инфраструктуры, %				Необходимые инвестиции, млрд руб.			Инвестиционный разрыв, млрд руб. (%)
	2018	2025	2030	2030*	2018	2025	2030	2030
ЕС	25	28	30	27	18340	19200	23340	1410 (6%)
США	56,6	59	64	44	22440	25680	28160	8900 (31%)
Азия	48	54	55	30	88000	104500	115500	11000 (9%)
Россия	65,5	75,7	84	49,5	3245	3690	4070	1650 (41%)
Африка	65	70	73	53	9790	12155	13915	3850 (27%)
Все регионы	52,2	57,3	61,2	42	149790	169180	184985	26805 (15%)

* Процент износа инфраструктуры, который необходимо достичь к 2030 году

В результате проведенного анализа выявлены внутренние, обусловленные особенностями ТЭК РФ, и внешние факторы глобального характера, оказывающие влияние на переход к цифровой энергетике и развитие интеллектуальных электрических сетей (Таблица 1.1.2) [114]. Анализ показывает, что в ближайшем будущем топливно-энергетический комплекс должен стать гарантом «устойчивого развития» и справиться с нарастающим старением и износом энергетической инфраструктуры, обеспечивая при этом энергетическую и экологическую безопасность.

Таблица 1.1.2 – Факторы, оказывающие влияние на переход к цифровой энергетике

Технологические	Экономические
<p>Локальные причины:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Износ инфраструктуры (до 66 %); 2. Большая доля промышленной нагрузки, протяженная энергетическая инфраструктура, низкая плотность потребления электроэнергии; 3. Большая доля неиспользуемых резервов электрической мощности. Низкая доля использования присоединенной мощности; 4. Низкая наблюдаемость энергетической инфраструктуры и режимов её работы. <p>Глобальные причины:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Ускоренный рост потребления электрической энергии 2. Рост спроса на качество и бесперебойность обеспечения электроэнергией и энергетическими ресурсами; 3. Урбанизация и развитие мегаполисов; 4. Дефицит и профицит мощности электроэнергии; 5. Децентрализация в электроэнергетике; 6. Инновационное развитие технологий, устройств и материалов; 7. Масштабное развитие активных потребителей и электротранспорта. 	<p>Локальные причины:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Зависимость отрасли от иностранных технологий и оборудования; 2. Большая доля (более 50%) газа в электроэнергетическом балансе; 3. Ограниченное количество потребителей высокотехнологичных инноваций и энергоэффективного оборудования на внутреннем рынке РФ; 4. Неэффективность энергетических компаний и роста коммерческих потерь энергии; 5. Увеличение тарифов на энергоресурсы и расходов населения на их оплату; 6. Низкая энергетическая эффективность экономики России. <p>Глобальные причины:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Урбанизация РФ (городское население 67 %); 2. Значительный инвестиционный разрыв (1650 млрд. руб) в модернизацию инфраструктуры ТЭК РФ; 3. Развитие новые экономических моделей, основанные на цифровых технологиях; 4. Сегментирование рынка по платежеспособному спросу; 5. Нестабильная политическая и экономическая ситуация.
Экологические	Правовые
<p>Локальные причины:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Значительная доля (до 42 %) ТЭК в антропогенных выбросах парниковых газов; 2. Недостаточность инвестиций, ухудшение технического состояния и рост рисков возникновения аварий; 3. Природные чрезвычайные ситуации на территории РФ; 4. Необходимость стимулирования и учета использования вторичных ресурсов. 	<p>Локальные причины:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Спрос на доступность энергетической инфраструктуры и снижение времени технологического присоединения; 2. Необходимость мгновенных откликов на неисполнение обязательств участниками рынка; 3. Социальное регулирования поставок энергоресурсов; 4. Стимулирование энергоэффективности и энергосбережения; 5. Цифровая трансформация системы взаимоотношений субъектов электроэнергетического рынка.

Продолжение таблицы 1.1.2

Экологические	Правовые
<p>Глобальные причины:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Снижение доли инвестиций на охрану окружающей среды; 2. Необходимость снижения загрязнения воздуха выхлопными газами автомобилей; 3. Рост выбросов парниковых газов в атмосферу (2175 млн тонн CO₂-эквивалента в год) от энергетики с учетом потерь и технологических выбросов; 4. Тренд на декарбонизацию. 	<p>Глобальные причины:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Консолидация усилий власти, бизнеса, науки и образования; 2. Стимулирование коммерциализации инноваций в компаниях ТЭК; 3. Стандартизация отношений между активными потребителями, просьюмерами, агрегаторами и др.

1.2 Состав электромеханического оборудования на ГиГНП

В отраслях минерально-сырьевого сектора основными этапами получения продукции из полезных ископаемых являются [111]:

- добыча;
- транспортировка;
- переработка / обогащение.

Каждый из этапов отраслей связаны с технологическим с электроприводным оборудованием (Рисунок 1.2.1, Рисунок 1.2.2).

Потребление электроэнергии электроприводами главных механизмов можно представить двумя частями Таблица 1.2.1:

- полезная часть электроэнергии, которая идет на выполнение технологических процессов, совершаемых исполнительными механизмами электроприводов (данная часть энергии не может быть снижена);
- потери электроэнергии, которые могут возникать в результате неисправностей и эксплуатационного износа компонент автоматизированного электропривода, связанных с ненормированными режимами работы (рост данной части энергии сопряжен с типом и уровнем неисправностей).

Таким образом, автоматизированные электроприводы машин и установок горнопромышленных [144, 123, 179, 30] объектов, являясь главными

потребителями электроэнергии, обладают наибольшим потенциалом энергосбережения за счет средств мониторинга, диагностики технического состояния, оценки и прогнозирования остаточного ресурса [71].



Рисунок 1.2.1 – Производственный цикл полезного ископаемого

Таблица 1.2.1 – Характеристики основных машин и установок горнопромышленных объектов

Электрические машины и установки	Главные механизмы с электроприводами	Мощность электродвигателя	Энергетический вклад в стоимость конечной продукции
Добыча полезных ископаемых			
Экскаватор механическая лопата	Напор, подъем, поворот, ход	до 6 000 кВт	10 %
Экскаватор драглайн	Напор, подъем, поворот, ход	до 11 000 кВт	
Экскаватор роторный	Многоковшовое колесо, поворот, подъем, ход	до 8 000 кВт	
Транспортировка полезных ископаемых			
Самосвалы	Система электродвижения	до 2 000 кВт	8 %
Конвейеры	Тяговые установки	до 8 000 кВт	12 %
Обогащение полезных ископаемых			
Дробильные установки	Дробящий орган	до 3 000 кВт	7 %
Мельницы	Барaban	до 40 000 кВт	11 %

Обеспечение технологического цикла данными системами, реализованными на базе цифровых технологий, предусматривает не только минимизацию затрат на своевременное техническое обслуживание и ремонт, но и формирование алгоритмов упреждающего управления. Упреждающее управление заключается в оптимизации и коррекции систем управления электроприводом в условиях их специфичности и сложности, обеспечивая технологическую и энергетическую эффективность отдельных участков и всего цикла.

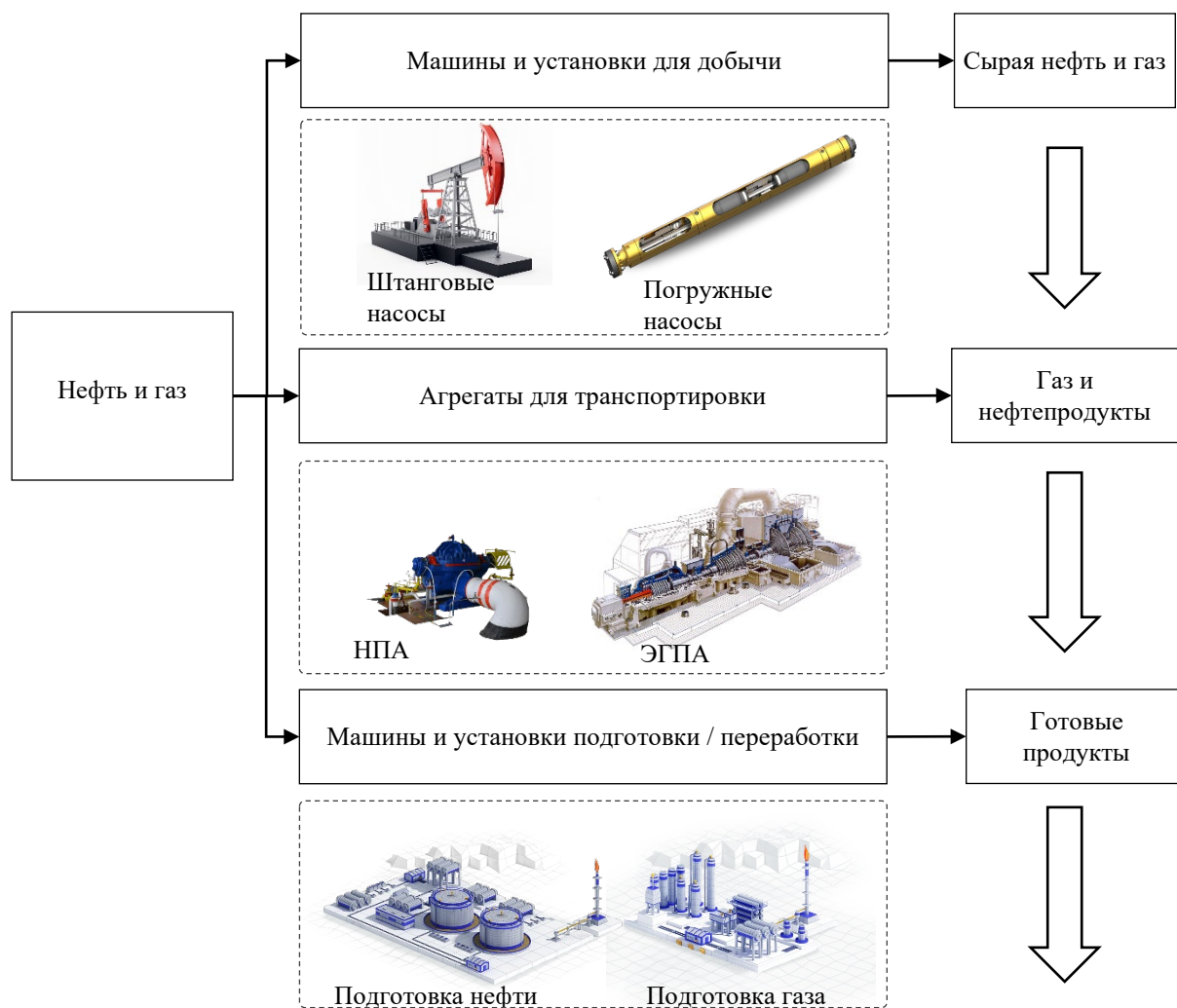


Рисунок 1.2.2 – Производственный цикл нефти и газа

Основными единицами производства данного сегмента является электропривод. Большой перечень исполнительных механизмов различного назначения имеет свою специфику. Электродвигатель, как основной электромеханический преобразователь, подвергается значительным перегрузкам, а повышенная запыленность, агрессивность или взрывоопасность сред, влажность и

перепад температур негативно сказываются на состоянии отдельных узлов и эффективности механизмов.

Развитие нефтедобычи последние 40 лет определили увеличение добычи посредством установок электроцентробежных насосов (УЭЦН) до 75% и снижение объемов добычи фонтанным (4,5%) и газлифтными способами (менее 1%), а также с помощью установок скважинного штангового насоса (УСШН) [92].

1.3 Оценка технического состояния и уровня энергоэффективности в ЭТК МСК

Электродвигатели переменного тока являются наиболее распространенным в мире видом электрических машин. Применение асинхронных двигателей (АД) непрерывно растет и, по прогнозу специалистов, в ближайшие 10-15 лет их доля в электроприводе может достичь 85-90 % [171]. Затраты на техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) ЭМО составляют значительную часть от общих эксплуатационных затрат предприятий, при этом, общая доля затрат в процессе эксплуатации возрастает по мере выработки оборудованием ресурса [81, 160].

ЭТК ЭМО нефтедобывающих промыслов являются основным узлом в стадиях добычи, бурении и транспортировке углеводородов. В оборудовании ЭТК ГиНГП особое место по энергопотреблению и по количеству выполняемых технологических задач занимает ЭМО. Ключевыми факторами, влияющими на эффективность ЭТК, являются климатические условия, территориальная удаленность от централизованных систем электроснабжения и ограниченная транспортная доступность оперативного обслуживающего персонала в крайне тяжелых условиях эксплуатации.

Себестоимость конечного продукта определяется не только качеством добываемого сырья и энергии и их рыночной стоимостью, но и учетом технологических потерь, которые определяют техническое состояние (ТС) парка оборудования и оптимальные алгоритмы управления. Тяжелые условия эксплуатации и территориальная отдаленность добычных комплексов отягощает

риски и ущерб при непредвиденных выходах из строя электротехнического и электромеханического оборудования.

В 2010 году в России насчитывалось 155 тыс. нефтяных скважин, в том числе в простое находилось около 25 тыс. скважин. Общее потребление электроэнергии на добычу полезных ископаемых составляет порядка 13% [110], а нефтяная промышленность занимает примерно 5,5% общей выработки электроэнергии в стране, при этом коэффициент мощности ($\cos\varphi$) ЭМО составляет около 0,7 [116].

В структуре себестоимости нефтедобычи с 1980 года происходит рост затрат на электроэнергию при снижении затрат на оборудование и фонд заработной платы. Так, в настоящее время на стоимость электроэнергии приходится 30-35% себестоимости добычи нефти.

Основными факторами снижения эффективности эксплуатации ЭМО являются ошибки при проектировании и выборе оборудования и завышенный запас мощности УЭЦН. Низкий уровень информатизации о потерях электроэнергии при эксплуатации ЭМО при неэффективном использовании систем управления (СУ) с частотно-регулируемым приводом (ЧРП) и отсутствие цифровых систем управления эффективностью эксплуатации являются причинами низкого уровня энергетической эффективности. Основная доля потерь приходится на УЭЦН – ЭЦН (40-60%) и погружные электродвигатели (ПЭД) (10-20%), до 8% составляют потери в кабелях [64].

Главным потребителем электрической энергии на горнопромышленных объектах являются автоматизированные электроприводы главных механизмов машин и установок. На долю электроприводов приходится до 80 % всей потребляемой электрической энергии [126]. В структуре некоторых машин, например, добычных, автоматизированные электроприводы потребляют 99 % от всей потребляемой электроэнергии [33]. ЭМО применяется на всех этапах работы с полезными ископаемыми от извлечения до готового продукта, что приводит к значительной доле энергозатрат в конечной стоимости продукции ГиНГП. Например, в конечной стоимости медной руды доля энергозатрат достигает 42 %; в стоимости железной руды – 51%; в стоимости золота – 19 % [78].

1.4 Технологии энергосбережения средствами электрического привода

Потребление электроэнергии ЭМО приходится на [1]:

- полезную часть электроэнергии в технологических процессах на работу исполнительных механизмов;
- потери электроэнергии, обусловленные конструкцией, режимами работы, условиями эксплуатации, а также наличием повреждений и эксплуатационным износом.

Электрические двигатели занимают потребляют около 75 % вырабатываемой электроэнергии [227]. Наибольшее применение из них получили асинхронные двигатели (АД) их доля в электроприводе достигает 85-90 % [78, 221].

Автоматизированные электроприводы машин и установок ГиНПП, являясь главными потребителями электроэнергии, обладают наибольшим потенциалом энергосбережения, а асинхронный двигатель на сегодняшний день и в перспективе ближайшие два десятилетия останется самым распространенным силовым преобразователем электроэнергии в механическую энергию [1].

Главное требование, предъявляемое к системам управления электроприводов современных машин и установок ГиНПП, заключается в повышении их энергетической эффективности, за счет снижения потерь в силовых преобразователях, ЭД и исполнительном механизме, без снижения их производительности, а в некоторых случаях с ее увеличением. Данные проблемы целесообразно решать за счет совершенствования алгоритмов систем управления электроприводов, без внесения существенных изменений в силовой части. При этом сложность системы управления может не ограничиваться. Основные энергосберегающие технологии в автоматизированном электроприводе представлены на рисунке (Рисунок 1.4.1).

Например, использование безредукторных электроприводов в конвейерных установках позволяет снизить энергопотребление до 7 %, относительно энергопотребления электроприводов с редукторным соединением приводных двигателей и тяговых барабанов конвейеров. Использование безредукторных мельниц с кольцевым электродвигателем, позволяет не только сократить

энергопотребление, но икратно увеличить их производительность. Например, максимальная мощность мельниц с редукторами и зубчатым венцом достигает 10 000 – 12 000 кВт, а максимальная производительность безредукторной мельницы может достигать 40 000 кВт.



Рисунок 1.4.1 – Энергосберегающие технологии автоматизированных электроприводов

Износ машин и механизмов также влияет на уровень энергосбережения, поскольку вид и уровень дефекта влияет на рост потерь электроэнергии [85]. На примере насосной установки показан возможный риск критических потерь электроэнергии при крайней степени развития дефектов (Таблица 1.4.1) [339, 341].

Таблица 1.4.1 – Потери электроэнергии с дефектами электропривода насосной установки

Компоненты электропривода	Дефекты	Потери электроэнергии, %
Преобразователь частоты	Пробой силовых ключей	До 50
	Потеря управления силовыми ключами	20
	Нарушения охлаждения	5-7
Электродвигатель	Короткое замыкание (межфазное, межвитковое, на корпус)	30
	Износ подшипников	10-15
	Разрыв стержней ротора	20
	Несоосность валов	7-10
Рабочий орган	Кавитация насоса	до 10
	Внешней раковины	до 10
	Лопастей	до 10

При этом наличие дефектов приводит не только к затратам в виде дополнительной электроэнергии, но и к потерям, вызванным нарушениями в

технологическом цикле на последующих этапах производства, что приводит к росту себестоимости конечного продукта.

1.5 Виды конструкций двигателей и повреждений

Конструкциям различных видов двигателей посвящен ряд публикаций и методической литературы [46, 81, 75, 171, 146].

Существующая на сегодняшний день классификация электрических машин:

- ВРД – вентильный реактивный двигатель;
- АДКР – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором;
- АДФР – асинхронный двигатель с фазным ротором;
- СДОВ – синхронный двигатель с переменным напряжением;
- СДПМ – синхронный двигатель с постоянными магнитами;
- СДПМП – синхронный двигатель с поверхностной установкой постоянных магнитов;
- СДПМВ – синхронный двигатель с питанием от магнитов;
- СРД – синхронный реактивный двигатель;
- КДПТ – коллекторный двигатель постоянного тока;
- БДПТ – бесколлекторный двигатель постоянного тока.

В области электрических машин асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (АДКР) занимает преобладающее место, и стал одним из главных объектов исследований новых методов проектирования, строительства и технического обслуживания. Его простота по сравнению с другими типами динамических электрических машин сделала его одним из самых полезных изобретений. Поэтому в данной работе уделяется внимание именно этому типу двигателей, однако большинство выводов и результатов применимы ко всем видам как электрических машин, так и нагрузочным механизмам при определенной адаптации и уточнениях.

АДКЗ, как электромеханический преобразователь, представляет собой многокомпонентную систему (Рисунок 1.5.1). Он состоит из двух основных частей:

статора и ротора. Асинхронные двигатели, используемые в промышленности, в основном трехфазные, по сравнению с двигателями постоянного тока или однофазными переменного тока той же мощности намного меньше, легче, экономичнее и имеют меньший пусковой ток [118].

Повреждения и режимы эксплуатации анализируются в ряде работ ученых [137, 177, 235]. Проявление дефектов на начальной стадии не приводит к возникновению аварийных режимов работы и к остановке АД. К таким повреждениям можно отнести:

- повреждения и межвитковые замыкания обмотки статора [253];
- нарушение целостности пакета активной стали [254];
- обрыв стержней ротора [255];
- механические ослабления креплений и муфт [258].

Согласно статистическим данным горных и нефтегазовых предприятий причинами выхода из строя асинхронных двигателей являются дефекты, представленные на рисунке 1.5.2 [265, 268].

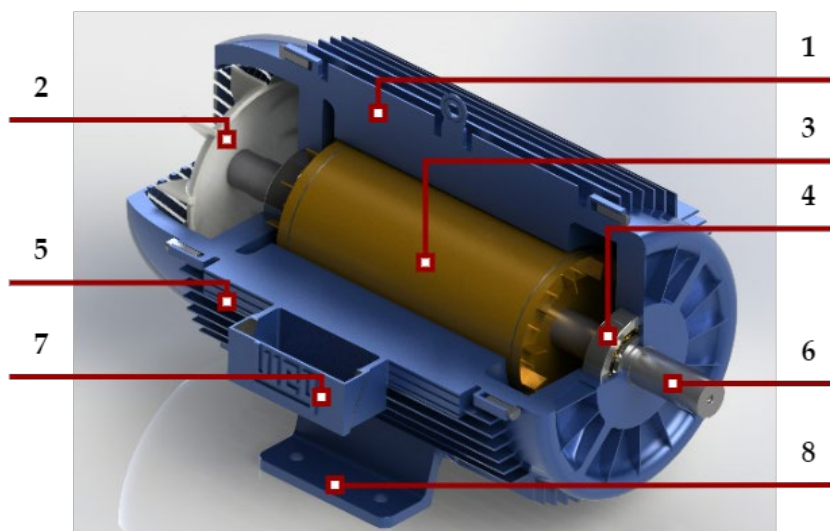
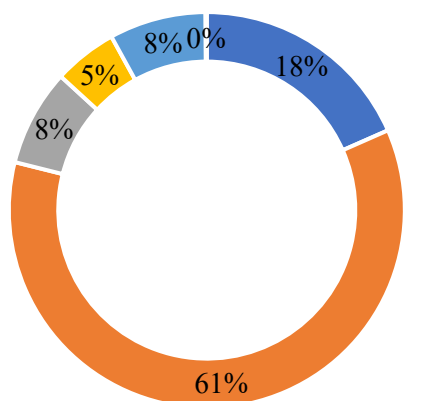


Рисунок 1.5.1 – Асинхронный двигатель: 1 – статор; 2 – крыльчатка вентиляции; 3 – короткозамкнутый ротор; 4 – подшипник; 5 – корпус с ребрами охлаждения; 6 – вал; 7 – коробка выводов обмоток статора; 8 – крепления (лапы)

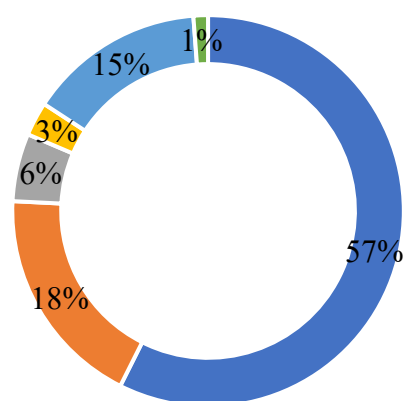
Асинхронные двигатели до 2 МВт



- Подшипник
- Обмотки статора
- Стержни/кольца ротора
- Вал или муфта
- Внешнее устройство
- Другие

а

Асинхронные двигатели более 2 МВт



- Подшипник
- Обмотки статора
- Стержни/кольца ротора
- Вал или муфта
- Внешнее устройство
- Другие

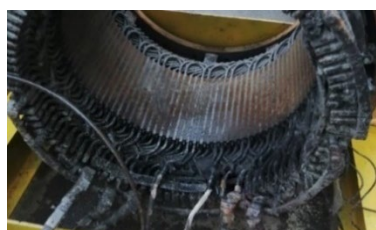
б

Рисунок 1.5.2 – Статистические данные о выходе из строя асинхронных двигателей

Виды повреждений ЭМО классифицируются по фактору влияния (Рисунок 1.5.3):

1) вызывающие асимметрию электрических цепей ротора (Рисунок 1.5.4 – Рисунок 1.5.5), такие как ухудшение свойств изоляции и возникновение токов утечки в обмотках ротора, обрыв стержня ротора АДКР, межвитковые замыкания и обрывы в обмотках роторов СД, АДФР и машин постоянного тока.

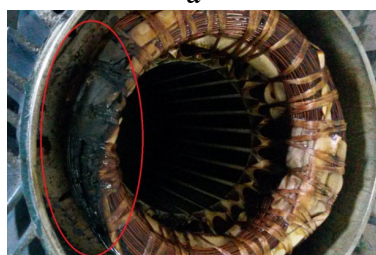
2) вызывающие асимметрию электрических цепей статора (Рисунок 1.5.3), такие как ухудшение свойств изоляции, возникновение токов утечки в обмотках статора, короткие замыкания и обрывы в обмотках статора.



а



б



в



г

Рисунок 1.5.3 – Повреждения статора АД

3) вызывающие асимметрию магнитных цепей, такие как осевое смещение ротора относительно статора, неравномерный воздушный зазор (эксцентриситет) статора, повреждения магнитопроводов ротора/статора, эксцентриситет внешней поверхности ротора относительно оси его вращения, ослабление прессовки пакета стали ротора/статора.



а



б

Рисунок 1.5.4 – Обрывы стержней ротора АД



а



б



в



г

Рисунок 1.5.5 – Дефекты подшипников АД: а – сепаратора; б – внутреннего кольца; в – внешнего кольца; г – тела качения

Статистика выхода из строя двигателей переменного тока (Рисунок 1.5.6) показывает, что для двигателей средней и большой мощности существует значительный разброс относительно установленного заводом-изготовителем паспортного срока службы [228]. При этом зачастую причины раннего выхода из строя остаются не раскрытыми, а при значительном превышении срока службы встает вопрос об энергетической эффективности работы машины, реальном

остаточном ресурсе и времени выхода из строя при фактических эксплуатационных параметрах и нагрузке. В случае же преждевременного выхода из строя искомыми являются факторы воздействия, которые привели к внезапной остановке.



Рисунок 1.5.6 – Статистика выхода из строя двигателей переменного тока для МСК [228]

1.5.1 Анализ факторов и статистики выхода из строя электромеханического оборудования

Многие факторы способствуют ухудшению состояния двигателя и возникновению нескольких типов неисправностей. По этой причине отказы электромеханического оборудования ГИНПП можно классифицировать с различных точек зрения. Таблица 1.5.1 показывает группировку, в соответствии с факторами окружающей среды, в которой работает ЭМО, и которая может привести к появлению неисправностей. Фактор может принадлежать к более чем одной группе во многих случаях.

Таблица 1.5.1 включает электрические и механические неисправности двигателя, сгруппированные по причинам их возникновения в роторе или статоре и в соответствии с факторами, которые их вызывают.

Различают два вида эксцентриситета: статический – несоосность внутренней поверхности статора и внешней поверхности ротора, и динамический – несоосность внешней поверхности ротора и оси его вращения.

Таблица 1.5.1 – Факторы, вызывающие отказы электромеханического оборудования

Условия эксплуатации	Вид воздействия	Состояние оборудования	Человеческий фактор	Система электроснабжения	
Температура Влажность Ржавчина Вентиляция Грязь Посторонние объекты	Вибрация	Старение	Неправильно выбрано оборудование	Переходные процессы при: - коротком замыкании - колебаниях напряжения	
	Перегрузка				
	Частые пуски				
	Центрирование	Использование оборудования, отработавшего ресурс	Плохое использование	- резонансах - коммутациях	
	Резонанс				
	Токи вала				
	Токи подшипников				
	Грязь	Трение ротора о статор	Некачественные материалы	Отсутствие обслуживания и ремонта	- колебания нагрузки - регулирования мощности силовыми преобразователями
		Трение			
		Частичные разряды			
Посторонние объекты	Трение ротора о статор	Дефекты конструкции	Некачественное обслуживание или ремонт	Импульсы напряжения Провалы напряжения	
	Трение				
Посторонние объекты	Трение ротора о статор	Заводской брак	Неподходящие или некачественные детали	Несимметричное напряжение питания	
	Трение				
Посторонние объекты	Трение ротора о статор	Заводской брак	Недостаточно смазки	Наличие высших гармоник Внезапные аварии оборудования	
	Частичные разряды				

Эксцентриситет приводит к одностороннему магнитному притяжению и повышенному износу подшипников. В большинстве случаев наблюдается небольшая величина динамического эксцентриситета, обусловленная технологическими погрешностями изготовления ротора, и статический эксцентриситет, обусловленный износом подшипников и неточностями изготовления подшипниковых щитов и статора. Статический эксцентриситет может привести к задеванию ротора о статор, что ведёт к перегреву сердечников и пробое изоляции.

Таблица 1.5.2 – Механические и электрические неисправности в основных узлах АД

	Электрические		Механические	
	Причины неисправности	Неисправность	Неисправность	Причины неисправности
Статор	Вибрация катушек	Радиальное и тангенциальное перемещение Разрушение крепления обмотки Повреждение изоляции Короткое замыкание	Электромагнитный шум и вибрация Повреждение сердечника из-за трения со статором Разрушение изоляции и перегрев клиньев	Эксцентриситет ротора
	Старение, пробой изоляции	Короткое замыкание между: витками, катушками, фазами, фазой и землей	Разрыхление сердечника Потеря межслойной изоляции Разрушение изоляции Разрушение обмотки крепления Снижение производительности	Перегрев АД
	ТОиР	Перфорация и разрушение изоляции Формирование цепи между обмоткой и землей Стекание тока в землю Замыкание на землю	Повреждение сердечника при сборке Повреждение сердечника при сборке или перемотке	ТОиР
	Переходные процессы Качество электрической энергии	Разрушение изоляции Снижение производительности	Перегрев	Недостаток вентиляции
Ротор	Вибрация катушек	Радиальное и тангенциальное движение Разрушение обмоточного крепления Повреждение изоляции Короткое замыкание	Поломка вала Отказ подшипника, вентилятора и муфт Трение со статором Центробежные и тепловые напряжения Напряжения в лопастях и стержнях	Динамические сбои Неисправности приводного механизма
	Нарушение изоляции	Короткое замыкание между: фазами, фаз катушек и землей	Электромагнитные колебания и вибрация Повреждение сердечника из-за трения со статором Отказ подшипника Токи вала Искрение	Статический и динамический эксцентриситет

Продолжение таблицы 1.5.2.

	Электромагнитные неисправности	Смещения сопровождаются провалом (отклонением) напряжения	Эксцентриситет Скручивание Разрыв Остаточные напряжения Перегрузка Повреждение во время ремонта или монтажа	Вал
	Магнитные неисправности	Сломанные стержни Шум вибрация Скручивание вала Отказ подшипника Трение со статором	Ослабевание сердечника Потеря межслойной изоляции Отказ подшипника	Перегрев
			Перегрев	Недостаток вентиляции
			Эксцентриситет Электромагнитные колебания и вибрации Повреждение сердечника из-за трения со статором Токи вала Искрение	Подшипники

Обобщение данных по частоте отказов узлов и элементов асинхронного двигателя позволяет упорядочить и определить вклад различных типов неисправностей в электродвигателях мощностью от 1 до 150 кВт и возрастом менее 15 лет. Перечень отказов и их классификация (Рисунок 1.5.7).

На основе анализа констатируем, что наибольшее количество отказов происходит по причине повреждения подшипника, а статор и ротор соответственно на 2 и 3 месте.

Дефекты подшипников являются одной из основных причин разрушения электрических машин, поэтому их ранняя диагностика необходима для предотвращения более катастрофических последствий отказа.

Эксплуатация электродвигателя с таким видом дефекта не приводит к немедленному выходу его из строя, но снижает надежность работы, долговечность и другие технико-экономические показатели. Искажается магнитное поле в воздушном зазоре, создается одностороннее магнитное притяжение, КПД снижается на 1,5-2%, появляются дополнительные высшие гармоники поля, снижается пусковой момент на 10-13%, растут местные нагревы на 5-6%.



Рисунок 1.5.7 – Перечень отказов и их классификация: а – причина отказа; б – дополнительные причины отказа; в – основные причины отказа; г – детали двигателя

В процессе эксплуатации при тяжелых условиях работы или из-за дефектов на стадии производства возникают обрывы или частичное повреждение стержней короткозамкнутой обмотки ротора. Встречаются обрывы нескольких расположенных рядом стержней, что приводит в последствии к значительному

ухудшению энергетических характеристик двигателя и последующему выходу его из строя.

Итоговый вид карты последовательных воздействий на ЭМО представлен на (Рисунок 1.5.8). Из-за тяжелых и сложных условий эксплуатации ЭМО подвержены ускоренному износу и различным видам отказов, включая утечки, поломку рабочего колеса, трение, неплотность, несоосность и т. д. [125] Эти дефекты могут вызвать высокий уровень шума и вибрации, увеличить потребление энергии и привести к катастрофическим авариям.

К видам тяжелых условий можно отнести превышение эксплуатационных ограничений по объёмной доле газа в добываемой продукции, которое приводит к ряду негативных последствий, в частности, существенному снижению напорной и энергетической характеристик насоса, его нестабильной работе, «срывам подачи» и преждевременным отказам ПЭД и оборудования скважины. Заклинивания вала электродвигателя при попадании механических частиц в подшипники ЭЦН соответствуют кратковременным и скачкообразным нагрузкам, которые сопровождаются существенными изменениями потребляемого тока.

На основе анализа работы выделены следующие возможные штатные и нештатные случаи в работе УЭЦН: устойчивый (штатный) режим работы; неустойчивость режима работы УЭЦН, вызванная попаданием в перекачиваемую жидкость газа в свободном состоянии; неустойчивость режима работы УЭЦН, вызванная периодическими срывами подачи; неустойчивость режима работы УЭЦН, вызванная попаданием механических частиц в подшипники скольжения насоса; неустойчивость режима работы УЭЦН, вызванная нарушением качества напряжения питающей электросети.

Поскольку внезапный выход ЭМО из строя на ГиНГП приводит к серьезным последствиям, угрожающим безопасности персонала, обнаружение дефекта на ранней стадии особенно актуально. Как упоминалось выше спецификой эксплуатации ЭМО в ЭТК ГиНГП определяется необходимость использования средств диагностики без установки датчиков непосредственно на оборудование, а

также тяжелые условия окружающей среды, оказывающие негативное воздействие на оборудование и приводящие к внезапным отказам.

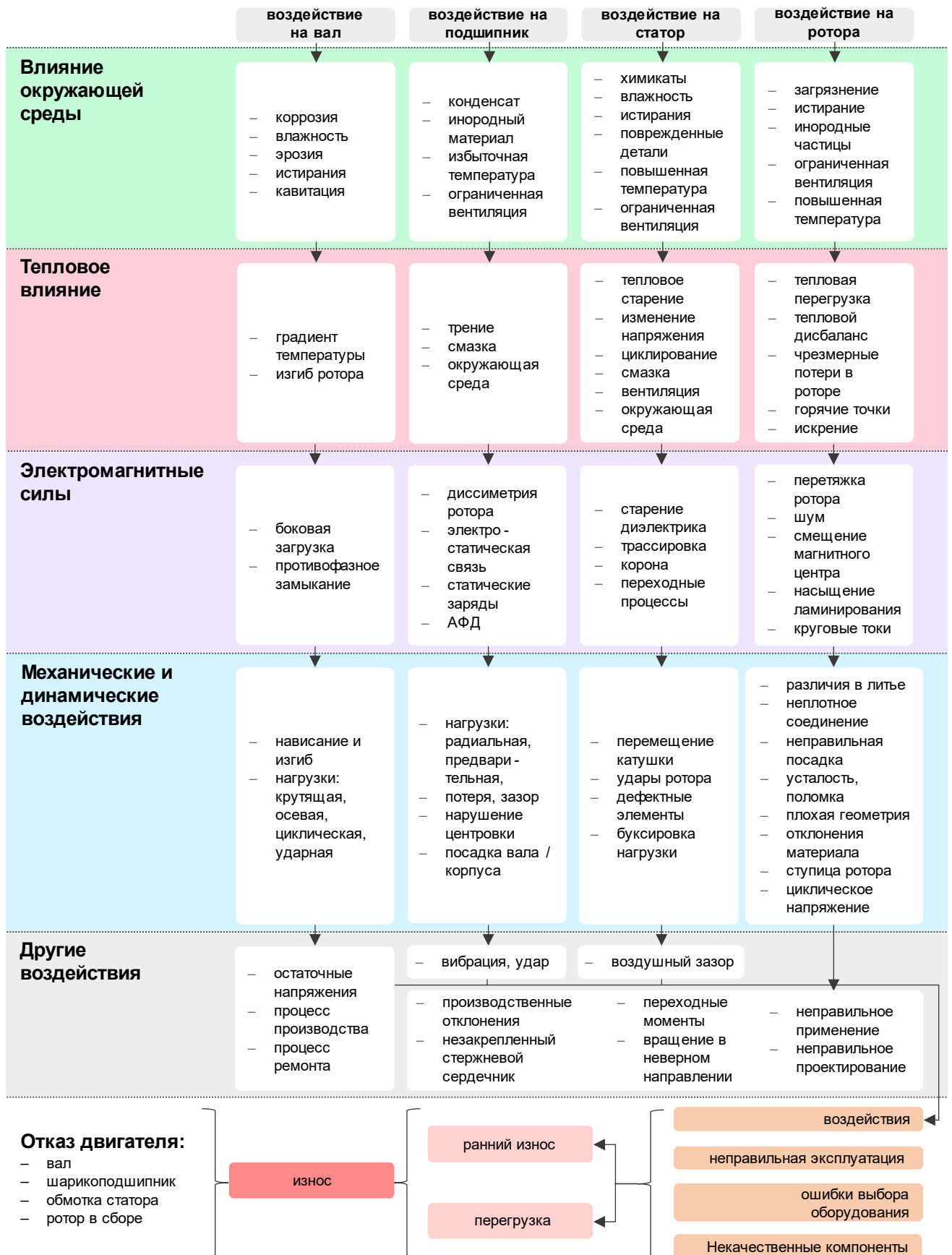


Рисунок 1.5.8 – Обобщенные последовательности воздействий факторов на АД

Согласно ГОСТ 27.002-2015 и ISO 2394:2015 отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта их классифицируют как [119, 121]:

- постепенный отказ – отказ, возникающий в результате постепенного изменения значений одного или нескольких параметров объекта;
- внезапный отказ – отказ, характеризующийся скачкообразным переходом объекта в неработоспособное состояние.

Для примера в горной отрасли основными воздействиями на ЭМО, которые приводят к отказу, можно отнести [96]:

- 1. колебания температуры:
 - в шахте – от 6 до 15 °С,
 - при открытой разработке – от -55 до 35 °С.
- 2. колебания относительной влажности:
 - в шахте – от 80 до 98%;
 - при открытой разработке – от 22 до 100%;
 - запылённость воздуха в шахте – от 70 до 695 мг/м³.

Горно-геологические условия, режим работы, состояние ЭМО меняются случайным образом, например, потеря работоспособности комбайнов наступает в результате комбинированного воздействия усталостных, износных и тепловых нагрузок. Сложность контроля за смазкой и обеспечения своевременной и качественной профилактики в специфических условиях работы дополнительно снижают ресурс и безопасность ЭМО.

По данным МЧС России около 20% пожаров в стране происходят по причине внезапных отказов электрооборудования. Основной причиной пожаров является нарушение правил устройства и эксплуатации электрооборудования, что служит причиной каждого пятого пожара, при этом число погибших составляет примерно 3 тыс. человек в год. Доля ущерба от пожаров от общего числа аварий в период с 2006 по 2018 гг. составляла в среднем около 27%.

Тепловыделение в электрических устройствах и установках связано с их спецификой или происходит как побочный продукт протекания электрического

тока и связанных с этим потерь энергии. Состояние отдельных узлов ЭМО определяет степень безопасной эксплуатации и риски возникновения аварийных ситуаций. Нагрев обмоток в процессе эксплуатации АД основной фактор, воздействующий на ускорение старения изоляция. Нагревание обмоток происходит рабочими и пусковыми токами, токами короткого замыкания и перегрузки, теплотой от посторонних источников, динамическими усилиями, возникающими при взаимодействии проводников с током, коммутационными перенапряжениями. В нормальных условиях эксплуатации тепло выделяется в окружающую среду, не вызывая значительного повышения температуры ЭМО. ЭМО как причину возгорания можно рассматривать с двух сторон. Во-первых, горение может происходить внутри ЭМО, замыкаться в полностью в нём, не распространяясь в окружающее пространство. Во-вторых, горение может распространяться на окружающие предметы, оборудование и конструктивные элементы объекта. В первом случае материальный ущерб ограничивается стоимостью ремонта или замены вышедшего из строя изделия, либо его вообще может не быть (например, в случае выгорания угольной пыли, скопившейся в корпусе электрической машины). Во втором случае ЭМО играет роль источника воспламенения. Здесь материальный ущерб может быть существенным, вплоть до гибели людей и разрушения объекта.

На шахте «Воркутинская» в 2013 году по причине фрикционного искрения вентилятора электродвигателя в результате трения о защитный кожух произошла авария, в которой погибли 18 работников шахты [124]. На шахте «Первомайская» повреждение в подшипниковом узле высоковольтного электродвигателя насоса привело к заклиниванию и трению, что в свою очередь - к резкому разогреву электродвигателя. Раскаленный отломанный вал и другие части подшипника были выброшены в выработку, где имелись горючие материалы, в результате возник пожар в бортах выработки.

Также по причине неисправности электродвигателя на одном из горных предприятий возник взрыв, когда роликовый подшипник на ведущей стороне заклинил, и повышение температуры достигло точки воспламенения смазки,

которая находится в диапазоне 250-300°C. Возникшее в результате возгорание испаренной смазки вызвало внутренний взрыв, который вышел через клеммную коробку двигателя, когда крышка была выбита.

На примере алмазодобывающего предприятия исследование показало, что вероятность доработки отдельных видов ЭМО до 20000 часов составляет только 25%. Для примера (Таблица 1.5.3) приведены критические интервалы времени проходческих комбайнов АМ-75 и его элементов, на которые приходится 90% вероятности отказов.

На состояние изоляции большое влияние оказывают температура и влажность воздуха, загрязненность и запыленность, что в условиях ГиНГП является одним из основных факторов утяжеления условий эксплуатации и формирует основную причину внезапных отказов ЭМО. На ГиНГП основные аварии связаны с пожарами – 58,5%, загазованностью – 17,9% и взрывами – 15,1% [26]. Очевидно, что ТС эксплуатируемого оборудования напрямую определяет аварийность на предприятиях нефтегазовой отрасли. При этом доля количества аварий и экономического ущерба, обусловленного пожарами ЭМО, в нефтегазовой отрасли составляет соответственно 23% и 35% и находится на втором месте после пожаров кабельных линий [25].

Таблица 1.5.3 – Критические интервалы времени проходческих комбайнов

Оборудование	Элемент оборудования	Критический интервал времени, часы
Проходческий комбайн АМ-75	Режущий орган	6500-9000 12000-14000
	Загребные лопаты	4000-10000 13000-17500
Электрическая машина режущего органа	Ротор	0-7500
	Подшипниковый узел	0-15000
	Обмотки статора	5000-10000 14000-14500

Оценку состояния безопасности ЭМО для ГиНГП в соответствии с фактическими и нормативными эксплуатационными и диагностическими параметрами, технико-экономическими показателями и величиной их отклонения от пороговых значений, можно характеризовать следующими уровнями:

1) нормальный, при котором параметры находятся в пределах пороговых значений, энергетические характеристики близки к своим паспортным значениям и диагностические показатели к технически обоснованным нормативам;

2) предкризисное, при котором пороговое значение хотя бы одного из параметров превышает пороговое значение, при этом остальные могут приблизиться к допустимой окрестности своих барьерных значений, что не нарушает технические и технологические возможности производства. При принятии мер предупредительного характера возможен возврата в нормальное состояние;

3) кризисное, когда превышены барьерные значения большинства основных параметров ЭМО, при этом возможно развитие аварии по причине выхода из строя единицы или группы ЭМО или связанного с ними технологического процесса или механизма, в состав которого они входят, при которой возможна значительная утрата потенциала производства вследствие исчерпания технического ресурса оборудования или остановка производства со значительными экономическими потерями;

4) критическое, когда превышены пороговые все или почти все пороговые показатели, а авария или остановка производства становится неизбежной.

1.6 Мониторинг и диагностика технического состояния электромеханического оборудования

Диагностика неисправностей электрического привода и связанного приводного механизма – это процедура отображения информации, полученной в пространстве измерений, о неисправностях машины (распознавание образов). Техническая диагностика электрооборудования на ГиНГП носит особый характер; специфика исполнения и режимов работы влечет за собой определенные

сложности, кроме того, в ряде случаев отсутствует непосредственный доступ к диагностируемому объекту. Анализ технических и технологических условий возникновения аварийных ситуаций при эксплуатации технологического оборудования ГиНГП показывает, что при разработке основ обеспечения безопасной эксплуатации необходимо учитывать не только ТС, но и нестационарность условий эксплуатации технологического оборудования и эксплуатационных рабочих параметров технологических процессов [99, 148].

Традиционно на предприятиях минерально-сырьевого (МСК) и топливно-энергетического комплексов (ТЭК) распознавание образов выполняется вручную с помощью графических инструментов, для которого требуется наработанный опыт высококвалифицированного персонала. Поэтому автоматизация распознавания образов является актуальным направлением, которое реализуется путем классификации сигналов на основе информации и признаков, извлеченных из сигналов.

Целью диагностики электромашинных агрегатов является повышение их надежности и увеличение технического ресурса [27]. Повышение надежности достигается за счет раннего обнаружения дефектов и неисправностей, что позволяет устранить их во время технического обслуживания и исключить отказы во время работы [108]. Повышение технического ресурса систем ответственного назначения обеспечивается за счет перехода к их техническому обслуживанию по фактическому состоянию.

Рассматривая проблему использования информации о техническом состоянии ЭМО для принятия решений по ремонтным воздействиям, целесообразно выделить три уровня адекватности оценок.

Первый уровень – идентификация технического состояния по показателям надежности, т.е. по параметру потока отказов или интенсивности восстановлений.

Второй уровень – идентификация технического состояния по характеристикам дефектов и повреждений, выявленных в определенные моменты времени.

Третий уровень – идентификация состояния по дискретно контролируемым технологическим параметрам, характеризующим ТС ЭМО.

Реализация третьего уровня возможна лишь при условии наличия диагностических систем. Второй уровень более доступен и требует достаточной информации по выявленным дефектам и повреждениям, а также моделей динамики их развития. Реализация первого уровня связана с достаточностью статистического материала.

Корректность принятия решения о введении того или иного регламента технического обслуживания и ремонта зависит от технического состояния оборудования. Регламент технического обслуживания и ремонта как система правил, определяющих технологию, средства, объем, методы и периодичность ремонтных воздействий, зависит не только от технического состояния рассматриваемого оборудования [14]. На него оказывает влияние структурная значимость данного оборудования в технологических процессах ГиНГП и конкретные условия функционирования (в том числе чисто ремонтного характера, например, оснащенность ремонтной базы, наличие ресурсов, персонала и др.).

Задача определения времени вывода в ремонт обследуемого оборудования включает в себя следующие стадии:

- определение состава выводимого в ремонт оборудования с учетом технологических взаимосвязей;
- определение потребности конкретного оборудования в объеме и сроке ремонта;
- определение ограничений по срокам и затратам (включая все виды обеспечения ремонта);
- подготовка графика вывода в ремонт, включающего в себя сроки остановов и их продолжительность.

Сущность этой задачи состоит в определении ремонтных программ оборудования с одновременным использованием нормативной базы и результатов оценки остаточного ресурса и технического состояния. Такое сочетание информации позволяет наиболее полно использовать любую информацию о

техническом состоянии оборудования, получаемую как с помощью систем диагностики, так и по экспертным оценкам.

Под ремонтными программами подразумеваются графики и сроки выполнения конкретных наборов ремонтных работ, наиболее полно отражающих динамику изменения технического состояния оборудования.

В общем случае диагностическими показателями являются: наработка до отказа, время восстановления, наработка до появления повреждения, характеристики развития повреждения, предельно допустимые уровни повреждения.

В этом случае к основным показателям диагностирования также относятся:

- состояние обмотки ротора;
- дефекты монтажа ротора относительно статора;
- состояние подшипниковых узлов;
- небаланс ротора;
- расцентровка валов;
- состояние фундамента агрегата;
- несимметрии фазных токов и напряжений, коэффициент мощности и коэффициент искажений;
- скользящих контактов между щетками и кольцами (для асинхронных машин с фазным ротором);
- уровень потерь (коэффициент полезного действия).

К дополнительным показателям диагностирования относятся [158]:

- уровень вибраций подшипниковых узлов в вертикальной и горизонтальной плоскостях;
- уровень искровых разрядов на щетках;
- температура подшипниковых узлов;
- температура обмотки статора.

К основным параметрам диагностирования относятся:

- действующие значения токов, напряжений, активной мощности электрических машин;
- мгновенные значения токов, напряжений, мощности электрических машин.

К дополнительным параметрам диагностирования относятся:

- сопротивление изоляции;
- уровень вибрации подшипниковых узлов в двух плоскостях;
- скорость вращения ротора;
- уровень разрядов на щетках;
- температура подшипниковых узлов;
- температура обмоток статора.

Кроме указанных параметров необходимо контролировать общую и среднесуточную наработку агрегата, среднюю и максимальную величину нагрузки.

Работы по продлению срока безопасной эксплуатации оборудования рекомендуется планировать и проводить таким образом, чтобы соответствующее решение было принято до достижения оборудованием установленного срока эксплуатации.

Объем работ по техническому диагностированию определяется по каждому ЭМО или группе однотипных ЭМО с учетом особенностей конструкции, сроков и условий эксплуатации.

На основании результатов технического диагностирования составляется заключение о возможности и условиях дальнейшей эксплуатации оборудования, с указанием срока, на который эксплуатация может быть продлена и рекомендаций по обеспечению безопасной эксплуатации в этот период.

Методы диагностики

В настоящее время получили развитие следующие методы диагностики технического состояния ЭМО:

- а) методы, основанные на анализе вибраций отдельных элементов агрегата;

- б) методы, основанные на анализе акустических колебаний, создаваемых работающей машиной;
- в) методы, основанные на измерении и анализе магнитного потока в зазоре двигателя;
- г) методы, основанные на анализе вторичных электромагнитных полей машины;
- д) методы, основанные на измерении и анализе температуры отдельных элементов машины;
- е) методы диагностики механических узлов (в частности подшипников), основанные на анализе содержания железа в масле;
- ж) методы диагностики состояния изоляции;
- з) методы, основанные на анализе электрических параметров машины.

В настоящее время получили развитие следующие методы диагностики технического состояния электропривода:

- а) методы, основанные на анализе вибраций отдельных элементов агрегата [24, 147, 150];
- б) методы, основанные на анализе акустических колебаний, создаваемых работающей машиной [106];
- в) методы, основанные на измерении и анализе магнитного потока в зазоре двигателя [152];
- г) методы, основанные на анализе вторичных электромагнитных полей машины [172];
- д) методы, основанные на измерении и анализе температуры отдельных элементов машины [166, 167];
- е) методы диагностики механических узлов (в частности подшипников), основанные на анализе содержания железа в масле [145];
- ж) методы диагностики состояния изоляции [81];
- з) методы, основанные на анализе электрических параметров машины [20, 23, 120, 206].

Методы вибродиагностики, получили наиболее широкое распространение [318]. Суть методов заключается в анализе вибрационных параметров в различных точках электродвигателя. К вибрационным параметрам относятся виброперемещение, виброускорение и виброскорость, причем регистрации подлежат как действующие (среднеквадратичные) их значения, так и их пик-фактор. Также большое распространение получили методы спектрального анализа, в которых в качестве диагностических параметров используют значения амплитуды отдельных гармонических составляющих вибрационного сигнала. Предельные уровни допустимых вибраций приведены в ГОСТ 12379-93. Контроль вибрационных параметров производят в нескольких точках, в основном в подшипниковых узлах и в местах крепления фундамента агрегата, причем регистрации подлежат вибрационные параметры в вертикальном, горизонтальном и осевом направлениях. В качестве первичных преобразователей могут быть использованы как контактные датчики (обычно пьезоакселерометры), так и бесконтактные (оптические датчики перемещения).

Методы хорошо проявляют себя при механических повреждениях ЭМО, однако электрические повреждения не всегда могут быть своевременно выявлены, что приводит либо к необнаружению повреждения, либо к ложному срабатыванию, в зависимости от пороговых значений, принятых в диагностической модели.

Недостаточно чувствительны к электрическим повреждениям методы акустической эмиссии, особенно в условиях ГиНПП, где имеется значительное количество источников шума.

Анализ магнитного поля требует непосредственного доступа к ЭМО, кроме того, установка датчиков возможна только при изготовлении машины, а датчики вторичных электромагнитных полей машины весьма чувствительны к действию внешних электромагнитных излучений.

Тепловизионные методы контроля достаточно точно выявляют состояние подшипниковых узлов, клеммных соединений ЭД, но для диагностики изоляции, а также в случае закрытого исполнения ЭМО и сильной запыленности не подходят.

Для оценки состояния изоляции используют повышенное напряжение, частичные разряды, измерение сопротивления изоляции, коэффициент абсорбции, тангенс угла диэлектрических потерь, акустические сигналы. Методы диагностики состояния изоляции без вывода оборудования из работы, разработаны в основном для высоковольтных ЭД (регистрация частичных разрядов).

Контроль изоляции и температуры

Способы и нормы контроля температуры обмоток приведены в ГОСТах [51, 52, 57]. Реле не реагирует на перегрузку ЭМО при медленном нагреве, высокой температуре окружающей среды, при слишком высокой отстройке тока срабатывания, при перезапуске ЭД в течение короткого периода времени. Устройства тепловой защиты могут встраиваться в обмотки и действуют как сетевой выключатель при этом при блокировке ротора тепловые выключатели не защищают двигатель.

При защите терморезисторами или датчиками с положительным температурным коэффициентом они встраиваются в обмотки ЭД и защищают его при продолжительной перегрузке, высокой температуре окружающей среды и блокировке ротора. Однако автоматическое отключение ЭД при достижении порогового значения температуры нарушает технологический процесс и не позволяет определить реальную температуру обмоток.

Эксплуатационные дефекты изоляции подразделяются на тепловые и усталостные. При эксплуатации изоляция электродвигателей подвергается тепловому, механическому, химическому, электромагнитному и др. воздействиям на неё влияют окружающая среда – температура воздуха, пыль, агрессивные газы и влажность. К тепловым относятся тепловое старение, спекание и обугливание.

Методы контроля и анализа вибраций и акустического фона

Анализ проводится по составляющим сигналам виброперемещения, виброскорости, виброускорения, получаемых с пьезоэлектрических датчиков вибрации и акселерометров [21], и рассчитанным на их основе параметрам, таким как мощность и огибающая сигнала мощности, амплитудные и среднеквадратические значения, спектры сигналов и мощности [150, 151, 300].

Однако, первичные преобразователи требуют высокую точность к калибровке, для установки на корпус необходим непосредственный доступ к ЭМО.

Вибрационное состояние оценивают путем измерения среднеквадратического значения (СКЗ) [22, 97, 168], однако при этом невозможно точно определения вид дефекта. Оценка с помощью фазовых портретов с использованием теории детерминированного хаоса используется для выявления дисбаланса, несоосности валов, потери жесткости опор, на фазовом портрете отображаются сразу две характеристики движения [22, 53]. К недостаткам относится сложность интерпретации результатов и реализации. Для выявления повышенных амплитуд вибрации на частотах, совпадающих с частотами возможных повреждений элементов используют спектральный анализ, [19, 21, 22, 149, 168, 176]. У этого метода высокая помехозащищенность и информативность, а к недостаткам относятся сложность в аппаратной реализации, низкая чувствительность к дефектам на ранней стадии развития и неустойчивость при анализе нестационарных сигналов. При изменении вида дефекта меняется спектральный состав огибающей, чем больше дефект, тем больше становится глубина модуляции [22, 97, 176]. Средства модального анализа редко используются для диагностики в процессе эксплуатации. Средства дефектоскопии используются для определения целостности металлических узлов и сложны в аппаратной реализации [22, 168]. В качестве критериев при диагностировании состояния подшипников качения эффективно применение пик-фактора, резкости, относительной глубины модуляции высокочастотного сигнала виброускорения и виброскорости, относительной величины ударных импульсов [94, 149, 176]. Однако данный метод обладает низкой помехозащищенностью. Для анализа непрерывных и дискретных сигналов используют вейвлет преобразования при котором раскладывают сигнал по базисным функциям, полученным из некоторого прототипа путем сжатий, растяжений и сдвигов, при этом частота и координата рассматриваются как независимые переменные, что дает возможность анализировать сигнал сразу в двух пространствах [47, 53]. К недостаткам можно отнести трудоемкость и сложность в интерпретации результатов. Статистический

анализ данных используют при определении сроков и причин изменения режимов работы и состояний на длительном промежутке времени [97]. Применение искусственных нейронных сетей повышает точность диагностики путем использования имеющихся знаний о состояниях ЭМО [48].

Подытоживая проведенный анализ основными параметрами, измеряемыми при диагностировании ЭМО, являются: вибрации, акустический шум, нагрев отдельных элементов машины, тепловизионная съемка, электрические параметры, включающие в себя отклонения токов и напряжений от номинальных значений (по амплитуде, частоте, фазе), появление высших гармоник в спектре токов и напряжений. Каждый из измеряемых параметров может быть связан с одним или несколькими диагностируемыми элементами (узлами) объекта. Поэтому в любом из существующих методов функциональной диагностики есть слабые места (Таблица 1.6.1), которые не позволяют выявить определенные дефекты в двигателе на ранней стадии развития, но выявляют косвенную причину этих дефектов, или их следствие. Также в ряде способов диагностики для определённых повреждений есть возможность обнаружить дефект, но нельзя оценить уровень его развития и, как следствие, сделать прогноз о возможной безотказной продолжительности работы двигателя. Это обусловлено влиянием дефектных узлов диагностируемого агрегата на другие, не повреждённые части и узлы, так как существуют тесные электромагнитные и механические связи. По итогам проведенного анализа сформирована сравнительная таблица наиболее перспективных методов, которые могут быть использованы для диагностики электромеханического оборудования в ЭТК МСК без вывода оборудования в ремонт.

В условиях предприятий использование многих указанных выше методов ограничено, так как не всегда возможен непосредственный доступ к диагностируемой электрической машине, а тем более установка на ней датчиков. Поэтому с точки зрения практической реализации систем диагностики преимущество имеют методы, основанные на анализе наблюдаемых электрических параметров, в частности тока, напряжения, потребляемой и отдаваемой мощности, измерение которых возможно и без непосредственного доступа к

диагностируемому электрооборудованию, а также без установки первичных измерительных преобразователей в непосредственной близости от него. При этом метода, позволяющего диагностировать все типы неисправностей, а также выявить причины на данный момент не существует. Большинство рассмотренных методов диагностики не определяют источники возникновения дефекта и не выявляют уровень его изменений.

Таблица 1.6.1 – Связь диагностируемых параметров и дефектов АД

Диагностируемый параметр	Повреждение изоляции обмотки относительно корпуса	Повреждение межфазной изоляции	Межвитковые замыкания	Дефект обмотки статора	Короткие замыкания в обмотке статора	Дефекты обмотки ротора	Повреждения подшипников	Обрыв стержней ротора	Повреждение магнитопровода ротора	Повреждение магнитопровода статора	Динамический эксцентриситет	Статический эксцентриситет	Дефект контактных соединений	Ослабление креплений	Режимы работы приводного механизма	Дефекты приводного механизма
Действующие и амплитудные значения тока и напряжения	-	+	-	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-
Параметры качества электроэнергии	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-
Спектр тока	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	+
Спектр напряжения	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	+	-	-	-	-
Спектр мощности	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	+
Динамический коэффициент мощности	-	+	+	+	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-	-	-
Величина потерь мощности	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+
Изменение потерь мощности	-	+	+	+	+	-	+	+	+	-	+	-	+	-	+	+
Коэффициент гармоник (тока и мощности)	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Анализ времени пуска	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+	-
Анализ момента	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+

Очевидно, что необходима разработка комплексной системы диагностики, которая должна базироваться на нескольких взаимодополняющих методах, которые дают возможность определить наибольшее количество самых опасных для данного оборудования дефектов. Оценка технического состояния производится на

основе многофакторного анализа: зависимостей напряжения и тока от времени, потребляемых электродвигателем; мгновенных мощностей каждой фазы; спектрального анализа полученных сигналов напряжения, тока и мощности; коэффициентов несимметрии (тока, напряжений, мощности); коэффициентов гармоник (тока и мощности); отдаваемой мощности электропривода; задания выходной координаты; величины потерь электрической энергии и др. (Таблица 1.6.2).

Таблица 1.6.2 – Применение методов диагностики для обнаружения повреждений в асинхронном двигателе.

Метод функциональной диагностики	Диагностируемые узлы электродвигателя							
	Изоляция обмотки относительно корпуса	Межфазная изоляция	Межвитковая изоляция	Обмотка статора	Обмотка ротора	Подшипники	Ротор	Активная сталь статора
Анализ вибраций	0	0	0	К	К	Х	Х	К
Акустический анализ	0	0	Х	К	К	Х	Х	К
Спектральный анализ токов	0	0	Х	Х	Х	К	К	В
Измерение внешнего электромагнитного поля	0	0	0	Х	В	К	К	0
Температурный, тепловизионный анализ	0	К	В	В	0	В	0	0
Токи утечки	Х	Х	0	0	0	0	0	0
Уровень электрической прочности изоляции	Х	Х	Х	0	0	0	0	0
Многофакторный анализ электрических параметров (ваттmetroграфия)	В	В	Х	Х	Х	К	К	В

Примечание (Х – возможность прямого обнаружения вида и уровня дефекта, К – возможность косвенного обнаружения вида и уровня дефекта, В – возможность обнаружения только вида дефекта, 0 – отсутствие возможности обнаружения дефекта).

Наличие нескольких диагностических параметров разной физической природы, позволяющих определить вид повреждения, дает возможность провести

более точный анализ возникшего дефекта и максимально исключить ошибку ложного определения, а также отбросить возникающие помехи.

1.7 Анализ формирования временных и пространственных гармоник магнитного поля оборудования

Неисправности электрических двигателей приводят к возникновению электромагнитной не симметрии поля в зазоре машины, что определяет эффективность методов, реализованных на измерении электрического тока и напряжения [296, 281, 100]. Преобразование временных и пространственных гармоник магнитного поля в зазоре асинхронного двигателя, можно представить в виде блок-схемы [286], (Рисунок 1.7.1).

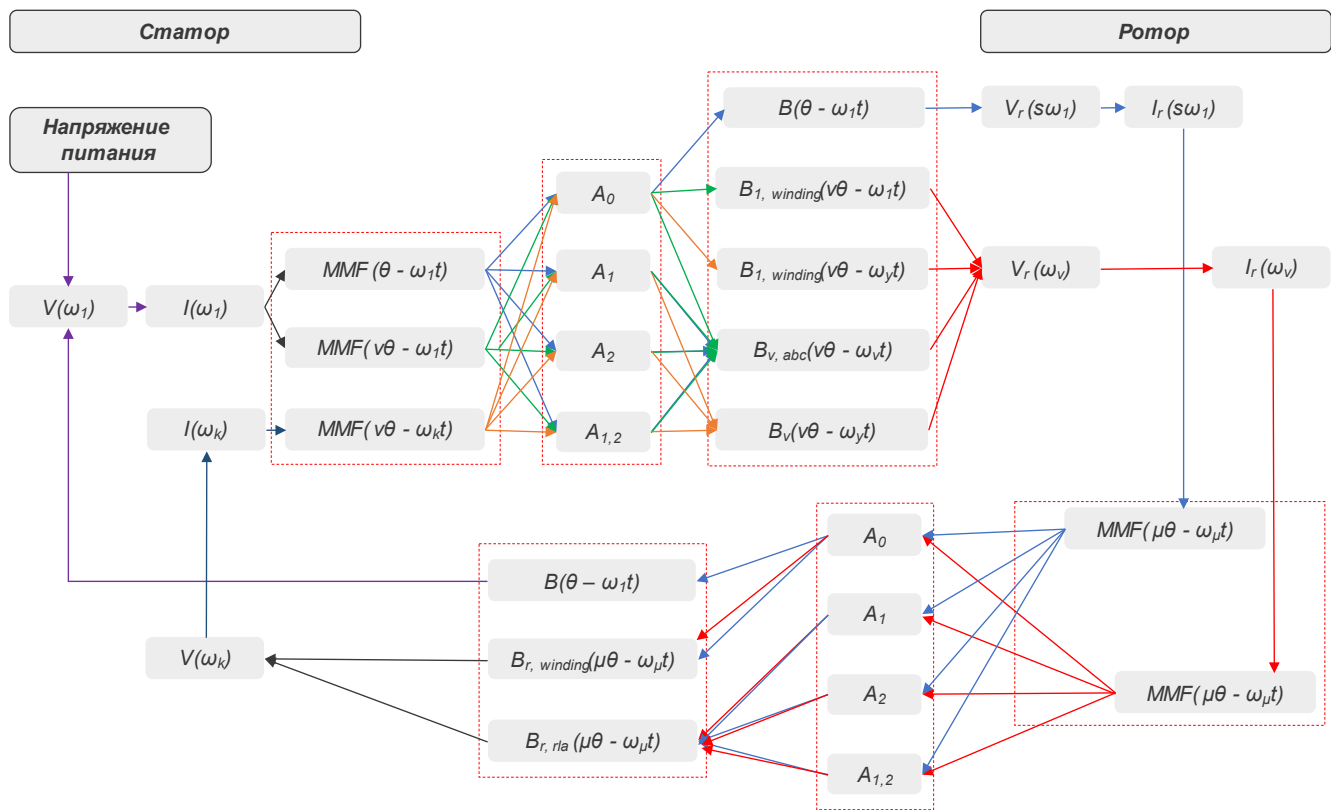


Рисунок 1.7.1 – Блок-схема преобразования временных и пространственных гармоник магнитного поля в зазоре асинхронного двигателя

Питающее напряжение $V(\omega_1)$ в идеальном случае содержит одну гармонику с частотой ω_1 и изначально создают в обмотках статора ток $I(\omega_1)$, также содержащий только одну гармонику.

Вследствие наличия зубцов ротора и статора и неравномерности воздушных зазоров возникают магнитодвижущие силы $MMF(\theta, \omega_k t)$, содержащие так называемые зубцовые гармоники. Вследствие неравномерности воздушного зазора магнитные проводимости Λ_i отдельных его частей отличаются, поэтому магнитная индукция $B(\theta, \omega_k t)$ в зазоре также содержит множество гармоник, индуцирующих токи в обмотке ротора. В дальнейшем поле ротора, обусловленное вторичными токами, взаимодействуя с полем статора, создает вращающий момент m . Это взаимодействие вызывает искажение токов статора, в результате чего даже при синусоидальном питающем напряжении ток статора содержит ряд гармонических составляющих, часть из которых несет информацию о повреждениях, что используется для диагностики асинхронных электродвигателей. Магнитное поле в зазоре асинхронного электродвигателя содержит как временные, так и пространственные гармоники, амплитуды которых определяются с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) исходного сигнала (Рисунок 1.7.2).

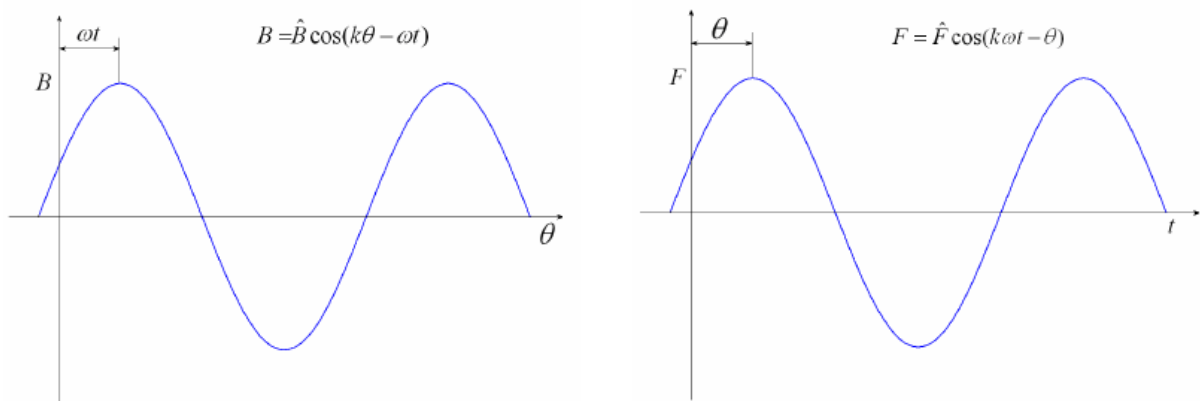


Рисунок 1.7.2 – Пространственные и временные гармоники индукции поля в зазоре и магнитодвижущей силы АД

Магнитная индукция в зазоре машины в общем случае является функцией как угла, так и времени, и может быть представлена в виде (1.7.1).

$$B(\theta, t) = \frac{\mu_0 A}{\delta(\theta, t)} \cdot \frac{1}{A} \cdot F(\theta, t) = \frac{\mu_0 A}{\delta(\theta, t)} \cdot F(\theta, t) = \Lambda(\theta, t) \cdot F(\theta, t), \quad (1.7.1)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, Гн/м;

A – векторный потенциал, $\frac{H \cdot c}{Kл}$;

$\delta(\theta, t)$ – величина воздушного зазора, м;

$F(\theta, t)$ – магнитодвижущая сила (МДС), А · виток;

$\Lambda(\theta, t)$ – магнитная проводимость, Вб · А.

Как видно из формулы (1.7.1), временные и пространственные гармоники магнитодвижущей силы (МДС) и временные и пространственные гармоники магнитной проводимости определяют полигармонический характер поля в зазоре. В связи с этим даже при синусоидальном питающем напряжении и при отсутствии повреждений магнитное поле двигателя содержит ряд гармоник, которые приводят как к искажениям кривой потребляемого тока двигателя, так и к возникновению вибраций [143]. При наличии повреждений эти составляющие изменяются, а также появляются новые гармонические составляющие. Это определяет актуальность задачи построения эталонных спектров указанных сигналов, а также определения зависимости составляющих спектра сигналов как от параметров, характеризующих режим работы двигателя, так и от типа и характера развивающихся повреждений.

Гармонический состав питающего напряжения также оказывает существенное влияние на гармонический состав МДС.

Для k -той гармоники токов в каждой из фаз двигателя справедливо выражения (1.7.2) – (1.7.5)

$$I_{a,k} = I_{m,k} \cos(k\omega t - \varphi), \quad (1.7.2)$$

$$I_{b,k} = I_{m,k} \cos\left(k\omega t - \varphi - \frac{2\pi}{3}\right), \quad (1.7.3)$$

$$I_{c,k} = I_{m,k} \cos\left(k\omega t - \varphi - \frac{4\pi}{3}\right), \quad (1.7.4)$$

где $I_{m,k}$ – амплитуда k -той гармоники тока, А;

ω – угловая скорость вращения поля статора, $\frac{рад}{с}$;

$$\varphi = \frac{\pi}{2} + \varphi_1, \quad (1.7.5)$$

где φ_1 – угол сдвига по фазе между током и напряжением, *рад*.

Тогда момент, создаваемый соответствующей гармоникой тока, будет равен (1.7.6).

$$M_{m,k} = \frac{3}{2} \frac{W_{se} I_{m,k}}{2} \cos(p\omega t - k\omega_1 t), \quad (1.7.6)$$

где W_{se} – число витков обмотки ротора,

p – число пар полюсов,

ω_1 – частота сети, рад/с.

Пространственные гармоники МДС включают в себя МДС ротора и статора (1.7.7).

$$F(\theta, t) = F_s(\theta, t) + F_r(\theta, t), \quad (1.7.7)$$

МДС статора равна (1.7.8).

$$F_s(\theta, t) = \sum_{\nu=1}^{\infty} \hat{F}_{s,\nu} \cos(\nu p \theta - \omega_1 t - \varphi_1), \quad (1.7.8)$$

где $\nu = 6g_1 + 1$, $g_1 = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ – порядок пространственных гармоник;

$\hat{F}_{s,\nu} = 3 \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{qN}{\nu} k_{p\nu} k_{d\nu} I_1$ – амплитуда зубовых гармоник МДС;

q – число параллельных ветвей обмотки,

W – число проводников в пазе;

$k_{d\nu}$ – коэффициент распределения обмотки для ν -ой гармоники;

$k_{p\nu}$ – коэффициент скоса пазов для ν -ой гармоники;

I_1 – первая гармоника тока статора, А.

Гармоники МДС ротора можно также выделить через число пазов статора (1.7.9).

$$\nu = \left(g_1 \frac{Q_s}{p} + 1 \right), \quad (1.7.9)$$

где Q_s – число пазов статора.

С учетом сказанного, спектр МДС статора содержит угловые частоты (1.7.10).

$$\omega_\nu = \frac{\omega_1}{\nu p} = \frac{\omega_1}{(6g_1+1)p}, \quad (1.7.10)$$

при этом возникают 1, 7, 13, 19, ... гармоники, вращающиеся в том же направлении, что и первая и 5, 11, 17, ... гармоники вращающиеся, в противоположном направлении.

МДС ротора содержит две группы гармоник, основные гармоники $F_{r,1}(\theta, t)$ и дополнительные $F_{r,2}(\theta, t)$ (1.7.11).

$$F_{r,1}(\theta, t) = \sum_{\mu=1}^{\infty} \hat{F}_{r,1} \cos(\mu_1 p \theta - \omega_{\mu,1} t - \varphi_\mu), \quad (1.7.11)$$

где $\mu_1 = \left(g_2 \frac{Q_r}{p} + 1\right) c$, $g_2 = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ – порядок пространственных гармоник;

$\omega_{\mu,1}$, φ_{μ} – частота и фаза μ -й гармоники, $\frac{rad}{c}$ и rad , соответственно;

$\hat{F}_{r,\mu} = -(-1)^\mu \frac{3\sqrt{2}qN}{\pi\mu_1} \xi_1 \xi_\mu \cos(\varphi_1)$ – амплитуда зубовых гармоник МДС;

ξ_1 , ξ_μ – обмоточные коэффициенты ротора для основной и μ -ой гармоники.

Следовательно, спектр МДС ротора содержит угловые частоты (1.7.12) – (1.7.13).

$$\omega_{\mu,1} = \omega_1 \left(1 + \frac{g_2 Q_r (1-s)}{p}\right), \quad (1.7.12)$$

где s – скольжение двигателя.

$$F_{r,2}(\theta, t) = \sum_{\nu=1}^{\infty} \hat{F}_{r,2,\mu} \cos(\mu_2 p \theta - \omega_{\mu,2} t - \varphi_{\mu}), \quad (1.7.13)$$

где $\mu_1 = \left(g_2 \frac{Q_r}{p} + \nu\right) c$, $g_2 = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ – порядок пространственных гармоник;

$\hat{F}_{r,2,\mu} = -(-1)^\mu \sqrt{2} I_{r\mu} \frac{\nu}{\mu} \xi_\nu$; $I_{r\mu}$ – μ -я гармоника тока ротора.

Следовательно, спектр МДС ротора содержит также угловые частоты (1.7.14).

$$\omega_{\mu,2} = \omega_1 \left(1 + \frac{g_2 Q_r (1-s)}{p}\right). \quad (1.7.14)$$

Из-за наличия вышеуказанных гармоник ток статора также будет содержать соответствующие частоты, как при отсутствии, так и при наличии повреждений. То есть диагностика по спектрам потребляемого тока требует знания текущего гармонического состава электрических сигналов двигателя и эталонного сигнала, исправного ЭД в том же режиме работы, с учетом информации о конструктивных параметрах двигателя.

В спектре тока статора помимо гармоник сетевого напряжения присутствуют гармоники с комбинированными частотами, амплитуда которых зависит от амплитуды переменной составляющей скольжения, и как следствие от инерционности и амплитуды колебаний момента сопротивления на валу. Третья гармоника характеризует наличие межвитковых и межфазных замыканий [102], а также эксцентриситет и обрывы стержней АДКР [98].

МДС обмотки каждой фазы статора представляет собой сумму неподвижных в пространстве и пульсирующих во времени гармоник, для каждой гармоники МДС находится сложением данных гармоник всех трех фаз. Сумма МДС всех трех фаз третьей и кратных ей гармоник, равна нулю, но межвитковые и межфазные замыкания нарушают симметрию что приводит к появлению в фазных обмотках статора соответствующие составляющие тока. В исследованиях показано [190, 194, 297, 299], что наличие межвитковых и межфазных замыканий увеличивает амплитуду в неповрежденных и снижает амплитуду третьей гармоники в поврежденной обмотке.

Обрыв стержней вызывает пульсаций всех гармоник, при эксцентриситете искажаются синусоидальность и симметричность фазных напряжений и токов, появляются дополнительные гармоники, растет их амплитуда относительно основной гармоники [127]. Амплитуда третьей гармоники при этом увеличивается в 2-4 раза больше, чем амплитуда основной гармоники в процентном соотношении.

Причинами акустического шума и вибраций ЭД являются технологические погрешности, вибрации в подшипниках и вентиляторе, электромагнитные силы, действующие на ротор и передающиеся корпусу машины, пульсации вращающего момента, вызывающие вибрации и шум статора и магнитострикционные силы [164, 236]. В АДКР вместе с вращением возникает радиальное притяжение ротора, а неуравновешенность радиальных сил ротора и статора, что порождает целый ряд гармонических полей, перемещающихся относительно друг друга [339], вследствие этого появляется шум, вибрация и дополнительный нагрев.

Несимметрия возникающая по причине дефектов, также приводит к изменению переходных процессов, возникающих при включении и выключении ЭМО, что также используется для обнаружения наличия повреждений [163] на основе анализа корреляционных функций и кепстров, а также на основе измерений характеристик переходных процессов.

Магнитные и электрические цепи машины обладают инерционностью, т.е. работают как своего рода фильтры низкой частоты, и нелинейностью, что приводит к возникновению различных нелинейных искажений, также на спектральный

состав токов влияет спектральный состав и несимметрия напряжений питающей сети и переходные процессы, обусловленные нестационарным характером нагрузки ЭМО. Например, нагрузка горнотранспортных машин, представляющая собой случайный процесс в полосе частот 10-25 Гц имеет равномерный спектр, то есть близкий к белому шуму [60]. Кроме этого, при изменении нагрузки возникает множество низкочастотных составляющих с частотами 0-2 Гц. Также множество частотных составляющих, кратных частотам вращения вала двигателя, возникает в узлах механических передач, число которых в приводах горнотранспортных машин может достигать 30. Все это создает ток, в состав которого входят гармоники, обусловленные всеми вышеперечисленными факторами, а также факторами, связанными с конкретными повреждениями электрической части электромашин.

При использовании регулируемого электропривода спектр питающего напряжения содержит множество частотных составляющих, зависящих от заданного значения выходной координаты [101]. По этим причинам непосредственная оценка состояния ЭМО только на основе анализа спектра тока и напряжения невозможна и перспективными является комплексный анализ электрических сигналов и дополнительных параметров, извлекаемых из мгновенных значений тока, напряжения и мощности. Как следствие, актуальной научной задачей является исследование, создание новых, и интеграция существующих методов технической диагностики ЭМО, учитывающих весь комплекс параметров наблюдаемых электрических сигналов и извлекаемых признаков, не исключая при этом использование нескольких различных методов, уточняющих и дополняющих друг друга.

1.8 Элементы интеллектуальной электроэнергетики и Индустрии 4.0 в ЭТК ТЭК и МСК

В 2017 г. в Европе сформировались три тренда, которые определяют будущее электроэнергетики, называемые 3«D»: *Decentralization*, *Decarbonization* и *Digitalization* [70].

Digitalization – цифровизация меняет работу энергосистемы, появляется новое понимание того, как используется электричество, как вырабатывается и поставляется электроэнергия, и как строятся заводы и системы для производства, транспортировки, распределения и хранения.

Decarbonization – декарбонизация связана с климатом, а также с поставками первичного топлива и электрификацией, и может принести как экономические, так и экологические выгоды.

Decentralization – децентрализация связана с изменением отраслей промышленности и распределения тенденций энергопотребления в сторону увеличения числа небольших экономических узлов, это стимулирует инновации от накопления энергии до интеллектуальных счетчиков и не только.

Изменения этих трендов во многом определяют будущее не только электроэнергетики, но и всего топливно-энергетического комплекса. Стремление к снижению негативного влияния на окружающую среду привело к распространению тренда на декарбонизацию. Активность политики в данном направлении отличается в зависимости от страны. В рамках данной модели реализуются меры, направленные на повышение энергоэффективности, применение возобновляемых источников энергии, повышение эффективности электросетей и развитие систем накопления энергии и др. Таким образом, концепция декарбонизации выходит за рамки электроэнергетики и распространяется на другие отрасли ТЭК. В области применения нетрадиционные и возобновляемые источники энергии (НВИЭ) наблюдается значительный прогресс, который обусловлен удешевлением технологий и повышением их качества. Технологии накопления позволяют обеспечивать выработку для энергосистем с неравномерным потреблением и расширить зоны распределенной генерации, являющейся одной из основных технологий децентрализации. Данный подход предполагает максимальную близость электроэнергии к потребителю, что становится возможным благодаря развитию умных сетей, позволяющих подключать все больше устройств и эффективно управлять энергопотреблением. Внедрение цифровых и интеллектуальных систем создают новые перспективы для

развития энергетики, а также делают возможным применение большинства технологий декарбонизации и децентрализации. Тренд на цифровизацию стал особенно актуальным с развитием технологий промышленного интернета вещей и установкой интеллектуальных датчиков мониторинга и контроля. Эффективность политики цифровизации подкрепляется опытом успешного применения ее технологий на ГиНГП. Одной из ключевых составляющих энергоперехода, объединяющих приведенные тренды, является повышение энергоэффективности.

Появление цифровых производств, умных фабрик и высокотехнологичных пространств способно перевернуть подход к энергообеспечению ГиНГП и достичь высокого уровня устойчивости и надежности энергоснабжения, автоматизировать контроль и управление электропотреблением с использованием новых подходов, материалов и технологий.

Процесс цифровизации объектов промышленности непосредственно связан с автоматизированной системой управления технологическим процессом, системой управления энергообеспечением, системой управления ЭМО, защитой и управления жизненным циклом объекта. Цифровизация производства происходит с внедрением следующих технологий:

- искусственного интеллекта в системах управления;
- систем диагностики, оценки и прогнозирования состояния электромеханических систем и оборудования;
- промышленного интернета вещей (производственных объектов);
- систем сбора и обработки больших данных обо всех объектах и процессах на всём жизненном цикле производства;
- моделирования оборудования и производственных площадок с дополнением большими данными;
- роботизированных и мехатронных технологических комплексов на основе высокоточных и высокоэффективных промышленных машин;
- интеграции мобильных устройств в системы управления и контроля производственных активов и других технологий.

Цифровизация является движущей силой «Индустрии 4.0» [113]. Достижения в области информационных технологий нового поколения, таких как: интернет вещей (*Internet of Things, IoT*), большие данные (*Big Data*), облачные вычисления (*Cloud computing*), искусственный интеллект (*Artificial Intelligence, AI / ИИ*) и других, а также их широкое применение в промышленности подталкивают к переходу к интеллектуальному производству – блестящие перспективы открывают мощь передовых вычислений и аналитики в кибер-пространстве (Прим.: здесь и далее употребляется приставка «кибер-», означающая процессы в виртуальной, вычислительной среде).

Оборудование и технологии в области интеллектуальной электроэнергетики (*Smart grid*) уже прошли точку «не возврата» и активно используют информацию для повышения энергоэффективности, надежности и устойчивости производства [332]. Для распределительного низковольтного узла нагрузки (Рисунок 1.8.1) современные компании предлагают объединение сетей электроэнергии и информации, что значительно расширяет возможности в области энергетического анализа и управления. Для этого компоненты системы: выключатели, разъединители, пускатели, миниатюрные сенсоры, контроллеры, передатчики и блоки управления в устройствах и системах, преобразованы в коммуникационные интеллектуальные устройства, которые в режиме реального времени экономично передают данные облачным сервисам с помощью *Industrial Internet of Things (IIoT)*. Одним из перспективных направлений использования полученных данных является непрерывная (онлайн) диагностика оборудования как фирм производителей электрооборудования систем электроснабжения, так непосредственно того потребителя, которого они обеспечивают энергией. В контексте ГиНГП это открывает перспективы применения электрических параметров и данных, собираемых интеллектуальными электротехническими комплексами и системами для эффективной и безопасной эксплуатации ЭМО.

Кроме этого, наличие полностью управляемых автоматизированных комплексов, огромного количества потребителей, обладающих собственными резервными источниками питания, и необходимость создания условий для

стимулирования использования технологий энергосбережения [6] обуславливают состояние того, что именно электроэнергетический комплекс, который во времена ГОЭЛРО был драйвером технологической революции, сегодня требует неотложной модернизации и реконструкции для создания максимально эффективной электросетевой инфраструктуры.

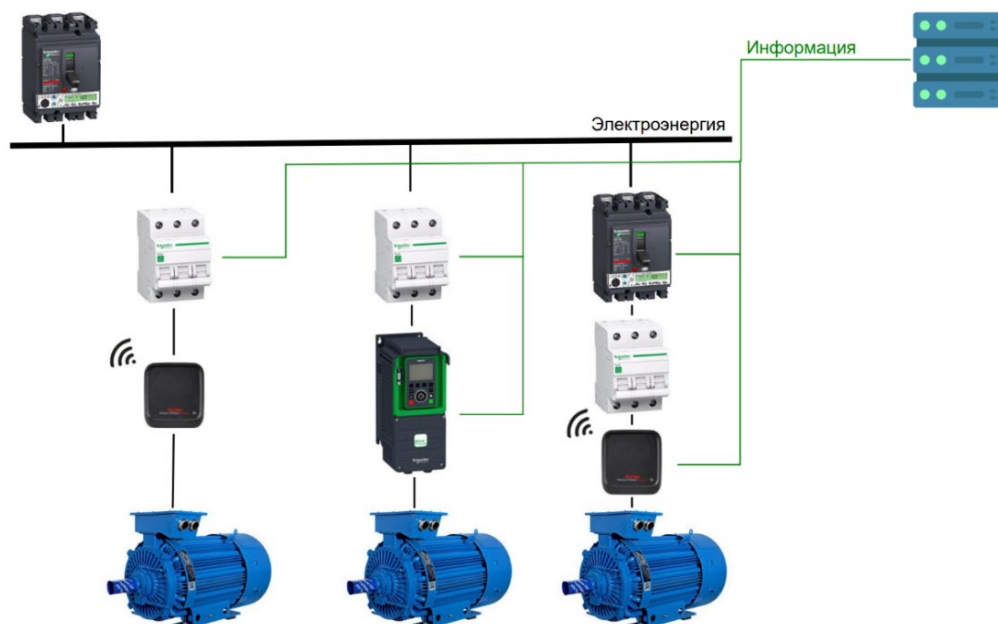


Рисунок 1.8.1 – Низковольтный распределительный узел нагрузки

По результатам изучения отечественных и зарубежных источников были выявлены технологии, воздействующие на эффекты в ТЭК [1, 331], благодаря которым осуществляется переход к цифровой интеллектуальной энергетике (ЦИЭ) Приложение А (Таблица А.1). Все проанализированные технологии были разделены на 3 группы по функциональным принадлежностям: *Smart Grid (SG)*, *Information technology (IT)*, *Digital technologies (DT)*.

Обобщенная схема связи технологий и эффектов Приложение А (Рисунок А.1), в каждой группе оранжевым цветом выделены технологии, приносящие наибольший эффект согласно проведенному анализу.

По результатам исследования была сформирована оценочная карта технологического покрытия причин необходимости цифрового перехода в электроэнергетике (Рисунок 1.8.2). В рамках исследования предложена концепция соотнесения технологий с причинами возникновения и пятью уровнями цифровой

трансформации. Такая оценочная карта поможет сформировать в последующем необходимые технологические приоритеты для достижения эффективности и безопасности функционирования электротехнических комплексов ГиНГП.

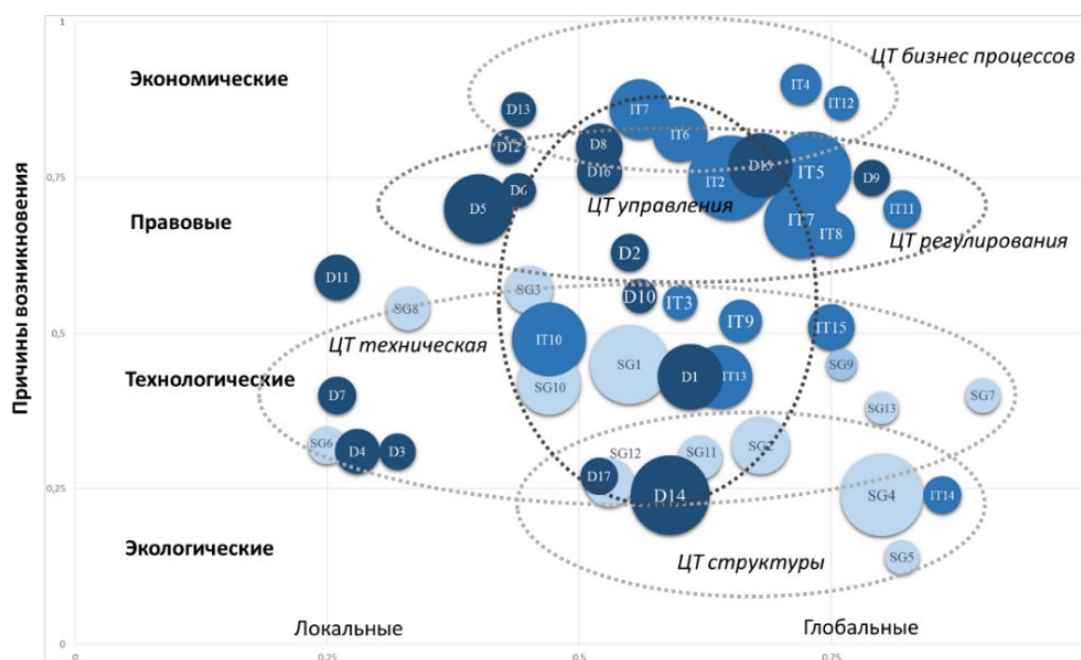


Рисунок 1.8.2 – Технологическая карта уровней цифровой трансформации

Поскольку необходимость проанализированных технологий продиктована изменениями не только в энергетике РФ, предстоящие преобразования будут проходить не равномерно, поэтому целесообразно для оценки предстоящего технологического спроса разделить трансформацию энергетики на несколько уровней.

1. Техническая трансформация – изменение и улучшение технических характеристик устройств, внедрение новых типов оборудования, материалов, модернизация электротехнических комплексов и систем.

2. Трансформация бизнес-процессов – типизация и стандартизация бизнес-процессов, создание единой модели данных и архитектуры информационных систем, изменение логики бизнес-процессов. Стандартные процессы будут реализовываться без участия человека, сократятся уровни управления, система управления преобразуется из вертикальной в матричную.

3. Трансформация в регулировании – формирование новой регуляторной среды, обеспечивающей благоприятный правовой режим для возникновения и

развития технологий, а также для осуществления экономической деятельности, связанной с их использованием. Внедрение цифровых технологий и платформенных решений в сферах управления и оказания услуг. Изменение отношений между государством, энергетическими компаниями, потребителями.

4. Трансформация структуры энергетики – изменение структуры энергетических систем в масштабах города/страны, появление умных потребителей и систем хранения энергии, активных энергетических комплексов, децентрализация, в том числе на основе вторичных ресурсов и возобновляемой энергии.

5. Трансформация в управлении – регулирование, экономические и экологические расчеты, мониторинг, анализ, управление и защита в энергетических системах в масштабе реального времени, в том числе на основе предсказательной аналитики.

Совмещение этих пяти уровней трансформации приведет к появлению ЦИЭ. Однако помимо причин сегодняшнего дня в мире появляются вызовы, которые только зарождаются и впоследствии могут распространяться при определенных условиях на ТЭК РФ в целом. К таким причинам можно отнести: кадровый голод для цифровой трансформации; повышение требований к качеству жизни; интеллектуальное удобство использования окружающего пространства и оборудования; требования к фиксации углеродного следа поставляемой энергии; возможность формирования персональной энергетической корзины; требования к экологичности поставляемой энергии; мгновенная фиксация и оплата нарушения параметров экологичности, качества и надежности поставляемой энергии и т.д. Представленные перспективные требования потребителей будущего создают спрос на развитие теории, методов и средств безопасной и эффективной эксплуатации ЭТК ГиНГП.

Результатом цифровой трансформация является усиление 5 основных свойств ЦИЭ: энергоэффективность, экологичность, экономичность, адаптивность и энергобезопасность.

По результатам анализа была проведена оценка положения технологии для диаграммы цикла зрелости технологий на 2022 год (Рисунок 1.8.3).

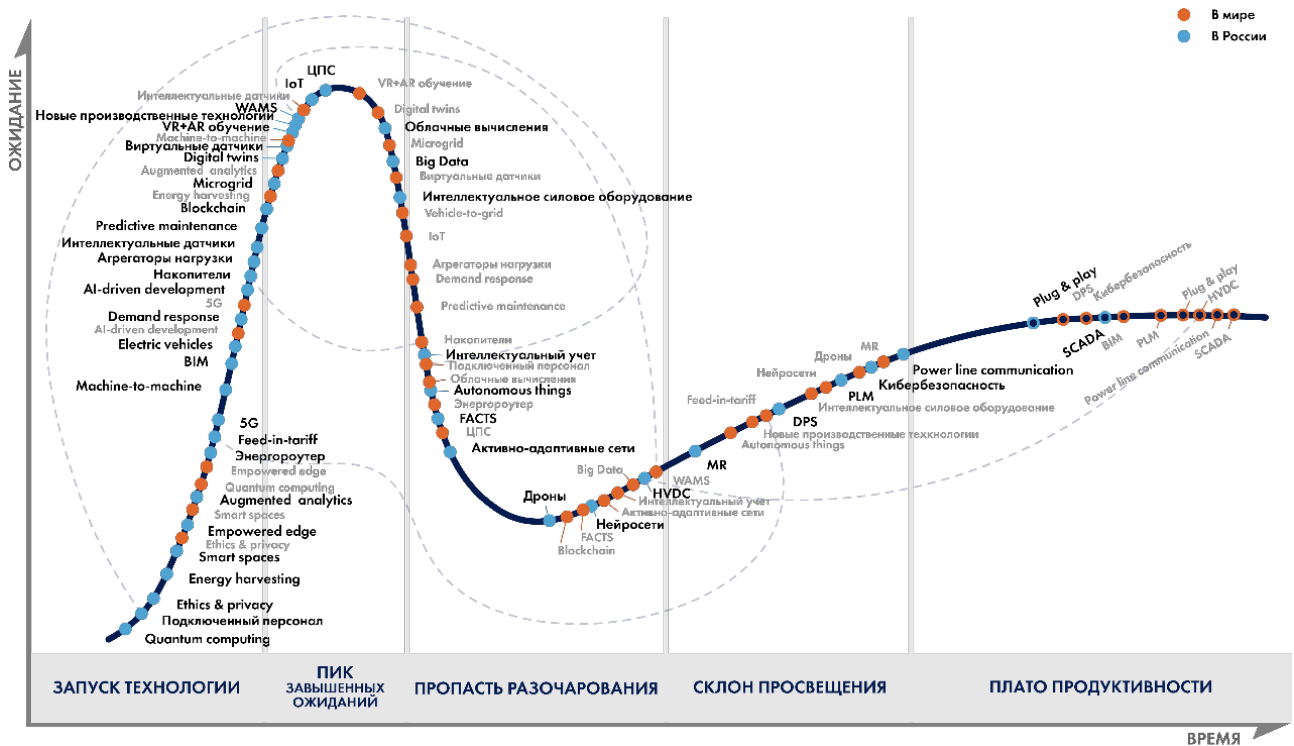


Рисунок 1.8.3 – Оценка зрелости технологий в России и мире в 2022 году

Цифровая трансформация в электроэнергетике и ТЭК в целом неизбежно затрагивает и влияет на цифровизацию ЭТК ГиНПП и проявляется в следующих основных направлениях:

- готовность энергетической инфраструктуры компании к развитию новых глобальных и локальных вызовов;
- улучшение качества и надежности энергоснабжения потребителей всех категорий за счет повышения количества «подключенных» устройств, оборудования и механизмов;
- экономия средств за счет перехода от планового ремонта к ремонту по фактическому состоянию оборудования;
- внедрение технологий полностью автоматизированного учета и анализа электроэнергии, которые сведут к минимуму потери электрической энергии;

- повышение надежности электротехнического комплекса в целом за счет внедрения интеллектуальных систем мониторинга и поиска мест и причин аварийных отключений сети, а также механизмов предупреждения аварий;
- сокращение сроков ввода новых потребителей;
- цифровое проектирование и моделирование ЭТК с целью повышения эргономичности и эффективности, а также примените созданных моделей и проектов в образовательных целях;
- переход на полностью автоматизированную систему документооборота, обеспечение 100% персонала электронными подписями и цифровыми носимыми устройствами;
- повышение эффективности сотрудников за счет персональных цифровых ассистентов;
- снижение эмоциональной перегруженности персонала за счет автоматизации большинства процессов.

1.9 Цифровые технологии в управлении эксплуатацией электромеханического оборудования

Для обеспечения безопасности и эффективности работы ЭМО на ГиНГП преимущественно используются традиционные методы обнаружения дефектов, основанные на периодическом техническом обслуживании и осмотре оборудования. В результате модернизации на существующих или на новых предприятиях внедряются современные технологические комплексы и системы с высокой степенью автоматизации. При этом происходит оптимизация программ ТОиР и сокращение затрат за счет обеспечения надежности критичных для деятельности предприятия производственных и технологических процессов на основе нескольких вариантов программ ТОиР [84, 1, 264], на сегодняшний день можно выделить следующие виды ТОиР:

- работа на отказ (реактивный) – оборудование эксплуатируется до отказа;

– плановое-предупредительный (превентивный) – плановое обслуживание, периодичность и продолжительность которых зависят от конструктивных и ремонтных особенностей оборудования и условий его эксплуатации;

– по фактическому состоянию (проактивный) – организация ремонтов по фактическому состоянию, основанная на поиске первопричин отказов. Для этого метода необходим способ, позволяющий выявлять дефекты и с заданной вероятностью давать прогноз о продолжительности работоспособного состояния без вывода оборудования в ремонт;

– прогнозный – основанный на прогнозе времени выхода из строя оборудования и с определенной вероятностью выявление вида и уровня дефектов. При этом с определенной периодичностью или в режиме онлайн снимаются диагностические показатели оборудования, на основе которых строятся тренды. Анализ полученных трендов позволяет предсказать вероятность отказа оборудования и определить дефект, вовремя предпринять меры – заказать необходимые для проведения ремонта материалы и детали и спланировать работы по обслуживанию конкретной единицы оборудования.

Под трендом понимается основная тенденция изменения контролируемых параметров в течение отрезка времени (например, времени эксплуатации насосного оборудования или от пуска до останова машины). В идеальном случае тренд соответствует модели деградации при повреждениях.

При системе ТОиР, ориентированной на работу до отказа, межремонтный цикл задан как календарный промежуток, который зависит от конкретного предприятия, эксплуатирующего ЭМО, и слабо коррелирует с фактическим состоянием оборудования.

При планово-предупредительной системе ТОиР межремонтный интервал задан как определенная наработка: машино-часы, объем продукции, количество оборотов и т.д.

В системе ТОиР по фактическому состоянию очередной ремонт необходим при достижении определенных диагностических параметров. Для этого необходим

способ, который позволил бы выявлять дефекты и с заданной вероятностью давать прогноз о продолжительности работоспособного состояния без вывода оборудования в ремонт. Однако данный подход все также основывается на запланированных программах ремонтных операций и не предусматривает изменение их объема. При этом прогнозирование основывается на моделях, использующих физическое или математическое описание ЭМО для оценки деградации компонентов, то есть все виды дефектов и возможных состояний заранее известны [1]. Точность этого подхода зависит от модели, а также использует статистические методы для ее проверки.

Предсказательная система ТОиР (ПСТОиР) основывается на прогнозе времени выхода из строя оборудования, для его работы необходимо выделить комплекс наблюдаемых диагностических или эксплуатационных параметров, которые будут периодически или непрерывно сниматься, накапливаться и анализироваться. В данной системе на основе предсказанного времени достижения предельных параметров определяются прогнозные виды и уровни развития дефекта на ранней стадии, при этом нет необходимости математического и физического описания дефектов и их взаимосвязи с наблюдаемыми параметрами. Данный подход может быть основан как на экспертных системах и нечеткой логике, так и на собранных данных различной физической природы для обработки статистическими, стохастическими моделями или моделями и алгоритмами, относящимися к классу средств искусственного интеллекта, например машинного обучения. В системе возможна оптимизация как времени воздействия, так вида воздействия с учетом выделенных критериев эффективности.

Однако для перехода к ПСТОиР необходимо разработать алгоритмы обработки эксплуатационных данных, данных систем мониторинга, технологического процесса для прогнозных оценок видов и уровней дефектов. Если система прогнозного обслуживания предсказывает время простоя или ухудшение производительности, этим процессом возможно управлять с помощью новой архитектуры автоматизации [117]. Сравнительный анализ функциональных признаков двух систем ТОиР представлен в (Таблица 1.9.1).

Как видно из таблицы и проведенного ранее в данной главе анализа для перехода к эксплуатации ЭМО в ЭТК ГиНПП на основе ПСТОиР необходимо не только учитывать специфику тяжелых условий и ограниченного доступа к оборудованию, но и разработать комплекс методов, алгоритмов, структур информационных потоков и критериев управления.

Таблица 1.9.1 – Сопоставление обеспечения реализации перехода к предсказательной системе ТОиР по сравнительным функциональным признакам.

Функциональные признаки	ТОиР по фактическому состоянию	Предсказательное ТОиР
Определение вероятности неисправного состояния оборудования	На основе статистических и физических моделей	На основе собранных данных об эксплуатации, диагностических параметров, данных мониторинга.
Определение остаточного ресурса	Статистика, теория вероятности, теория надежности	Средства искусственного интеллекта и др.
Выявление дефектных узлов	частично	да
Выявление дефектов на ранней стадии	нет	да
Прогнозирование временных рядов комплекса диагностических параметров	нет	да
Диагностика без остановки оборудования	возможна	Да
Принятие решения об объеме технического воздействия	нет	да
Возможность выявлять новые виды дефектов и их причины, а также новые состояния	нет	да
Необходимость физического описания повреждения	да	нет
Требование к сбору больших объемов данных	нет	да

При реализации перехода к ПСТОиР необходимо учитывать существующие на сегодняшний день системы управления активами, которые уже реализуют ряд функций и содержат множество информации о иерархии, истории работы, трудозатратах, стоимости материалов и запчастей, инструкциях, статистических показателях, планировании, учете и контроле выполнения ремонтных работ и др.

Исполнительные системы производства (*manufacturing execution system - MES*):

- сбор данных о расходах сырья;
- разработка программ по энергосбережению;
- расчет технико-экономических показателей;
- формирование нормативных (удельных) показателей;
- определение неэффективности загрузки или включения ЭМО;
- сбор данных о простоях;
- определение дополнительных потерь энергии во время простоев;
- эффективность энергопотребления;
- сбор данных для анализа качества продукции;
- формирование расписания ТОиР;
- мониторинг состояния и загрузки оборудования – число часов работы, количество запусков, количество аварийных остановок, количество продукции;
- ведение журнал персонала.

Существуют различные системы, упрощающие обслуживание электромеханического оборудования, также внедряются современные технологические комплексы и системы с высокой степенью автоматизации, такие как *ERP*, *EAM*, *CMMS* и др. [63].

В этих системах осуществляется сбор и хранение данных о работе ЭМО в специальной диагностической базе данных, что позволяет им выполнять различные функции:

1. Enterprise Asset Management (*EAM*) – управление активами предприятия включая управление финансами, качеством и трудовыми ресурсами в части ТОиР, материально-техническим обеспечением и складскими запасами [61].

2. Enterprise Resource Planning (*ERP*) – планирование ресурсов предприятия.

3. Reliability Centered Maintenance (*RCM*) – программа обслуживания для обеспечения надежности оборудования:

- поддержание машин и механизмов в исправном состоянии;
- минимизирование и устранение негативных последствий отказов оборудования;

– сокращение затрат на эксплуатацию на 20 и более процентов при сохранной работе оборудования [273].

4. *CMMS (Computerized Maintenance Management System)* – автоматизированные системы управления ТОиР – достаточно несложные информационные системы, которые нацелены на управление только процессами ТОиР.

По результатам анализа в режиме реального времени диагностических параметров определяется ТС ЭМО и оценивается остаточный ресурс. Под анализом в режиме реального времени подразумевается, что анализ данных осуществляется сразу же после их сбора в том же приложении.

Однако зачастую такие программные комплексы обладают недостатками, связанными с отсутствием адаптивности. Анализируя изменения сигнала, поведение программы должно меняться в соответствии с ними, например, сохранять определенные данные на диск или менять частоту оцифровки, а также выполнять функции автоматического управления или сигнализации. В приложениях, необходимых для разработки систем диагностики и оценки остаточного ресурса, требуется «интеллектуальность» и способность принимать решения в зависимости от различных условий – адаптируемость. Все это можно реализовать только путем встраивания комплекса алгоритмов анализа и наращивания модулей в программах комплексах.

Ядром комплексного метода диагностики является диагностическая база данных. Основными задачами, для решения которых создается база данных (БД) электромеханического оборудования, являются:

- централизованный сбор, хранение, обработка и анализ информации о техническом состоянии электромеханического оборудования;
- подготовка справочных и информационно-аналитических отчетов о техническом состоянии оборудования отрасли;
- обеспечение работ по паспортизации электромеханического оборудования, сбор, хранение и обработка соответствующей информации.

В этой связи архитектуры построения существующих информационных систем ТОиР (Рисунок 1.9.1) содержат два уровня БД. Первый уровень БД предприятия, в которой осуществляется предварительный сбор и обработка массивов диагностических параметров, которые поступают от программируемых логических контроллеров. Второй уровень – это удаленная база данных диагностики и оценки остаточного ресурса, которая обладает мощным вычислительным блоком, способным обрабатывать значительные данные и хранить их в большом объеме.

Согласно данной схеме, предприятие осуществляет сбор и хранение данных о работе ЭМО в специальной диагностической базе данных, внутри которой происходит агрегирование данных. Система обычно обладает функционалом расчётов косвенных параметров на основании данных технологических процессов, данных состояния ЭМО, данных диагностики и прочей информации, сохраняемой внутри диагностической базы данных. Примером таких систем являются:

- центр прогностики и удаленного мониторинга на основе программного продукта «ПРАНА», предназначенного для энергоблоков электростанций;
- *Zyfra Industrial IoT Platform* - российская цифровая платформа, позволяющая строить процессы управления через единую систему, реализующую интеграцию существующих систем автоматизации в единый комплекс;
- центр дистанционной диагностики ветроэнергетических установок компании *Siemens*;
- программно-аналитический комплекс *Avantis PRiSM* компании *Schneider Electric*, предназначенный для прогнозирования состояния оборудования;
- система интеллектуального контроля состояния машинного оборудования *Smart Machinery Health Management* компании *Emerson*;
- *Industrial Performance & Reliability Center* компании *General Electric*, осуществляющий удаленный мониторинг более четырех тысяч единиц оборудования.

– В общем виде сеть диагностики предприятия включает в себя измерительную часть, состоящую из датчиков, модулей сбора сигналов, необходимых в случае большого количества диагностируемого оборудования, логических контроллеров и сервера, который осуществляет связь посредством виртуальной частной сети (*VPN IPSec*) с удалённой базой данных. Система сбора и обработки на предприятии объединяется в «диагностический кластер», которому присваивается порядковый номер и отраслевой признак для более быстрой фильтрации и обработки данных по однотипному оборудованию. Архитектура системы предусматривает ввод диагностических данных от удаленных пользователей через *Web*-приложения с переносных носителей информации.

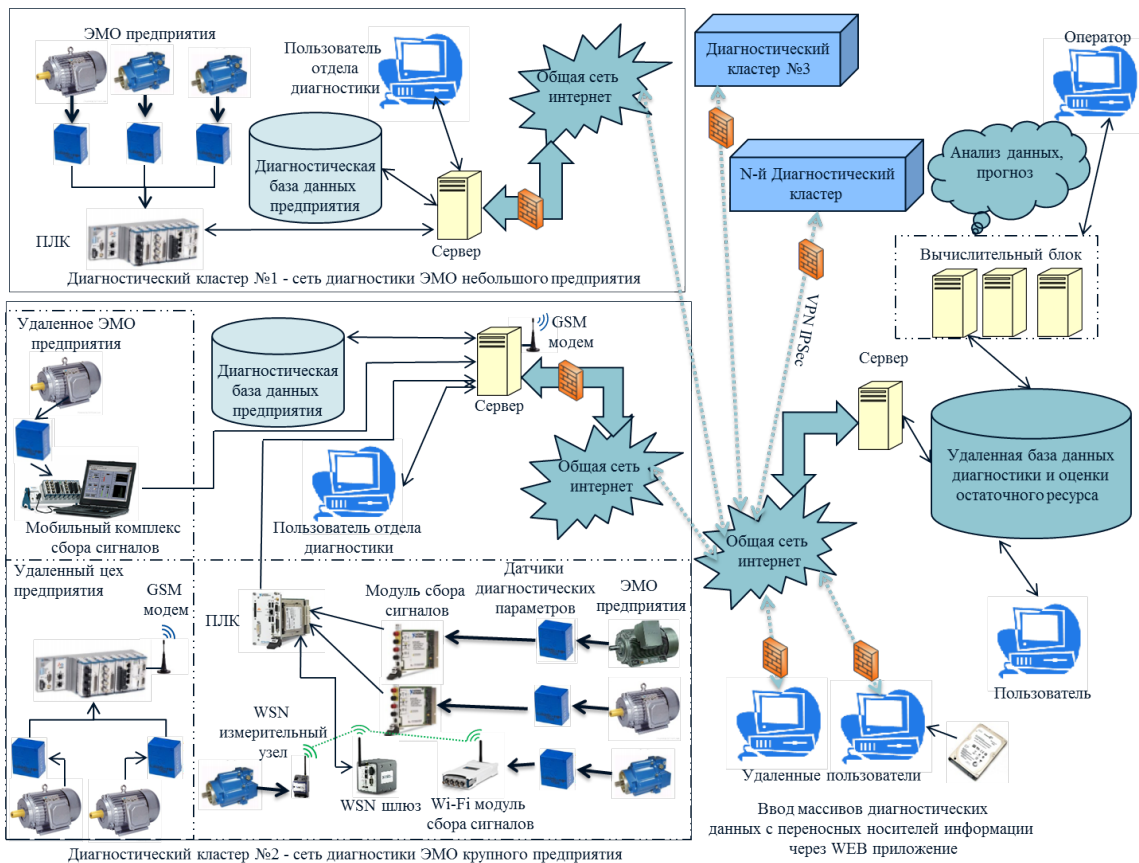


Рисунок 1.9.1 – Архитектура построения удаленной интерактивной системы диагностики и оценки остаточного ресурса электромеханического оборудования

Внутри «диагностического кластера» связь измерительной части с сервером может быть выполнена в нескольких видах в зависимости от рассредоточенности, удаленности, количества и вида электромеханического оборудования.

Создание удаленной интерактивной системы диагностики и оценки остаточного ресурса электромеханического оборудования позволяет объединить отраслевые предприятия в единую диагностическую сеть, организовать сбор и обработку статистики для более точной работы системы, удаленным пользователям оценивать находящееся в эксплуатации электромеханическое оборудование по фактическому состоянию, что приводит к снижению затрат на техническое обслуживание и ремонт.

1.10 Анализ перспектив развития цифровых двойников в ЭТК ГиНГП

Развитие цифровых технологий и постепенное распространение технологии *IIoT* позволило вывести локализованные базы данных в интернет-пространство и реализовать применение больших данных для оценки технического состояния. *IIoT* – это взаимосвязанные датчики, приборы, оборудование и другие устройства, объединенные в сеть с промышленными приложениями и облачными платформенными решениями. Эта возможность соединения позволяет собирать, обмениваться и анализировать данные, что потенциально способствует повышению производительности и эффективности, а также другим экономическим преимуществам.

В этом контексте для обеспечения непрерывности информации на протяжении всего жизненного цикла продукта, эффективного использования потока данных, поддержки принятия решений и прогнозирования поведения системы на этапе разработки продукта может помочь технология (или концепция) Цифрового Двойника (*Digital Twin*) (ЦД).

ЦД – это интегрированное моделирование оборудования, объекта или процесса, в котором используются математические модели, синхронизированные на основе текущих показаний датчиков для полного повторения поведения его физического двойника. ЦД состоит из физического объекта, виртуального объекта

и связанных данных, которые реализуют конвергенцию между физическим и виртуальным объектом, его пространством и окружением [188].

Если обобщить, то ЦД – это всеобъемлющее цифровое представление физического объекта или процесса. Он включает в себя свойства, состояние и поведение реального объекта или процесса с помощью моделей и данных. ЦД – это набор реалистичных моделей, которые могут имитировать его реальное поведение в развернутой (виртуальной) среде. ЦД развивается вместе со своим физическим двойником и остается его виртуальным аналогом на протяжении всего жизненного цикла объекта [233]. Из-за отсутствия конвергенции между физическим и виртуальным пространством данные в жизненном цикле ЭМО являются изолированными, фрагментированными и неизменяющимися, что не создает новой стоимости для компаний [303, 317, 321].

В течение фазы использования генерируется большой объем данных, таких как данные о состоянии объекта, данные рабочей среды, данные о поведении пользователя. Эти наборы могут быть использованы не только для обслуживания и ремонта, но и для улучшения изначально проекта изделия. Послепродажное обслуживание подразумевает выявление данных о причинах отказов, данные об обслуживании, качестве компонентов (деталей), данные о состоянии – все они записываются и управляются для прогнозирования срока службы объекта и других возможных отказов оборудования. Когда объект утилизируется (списывается), анализируется остаточный ресурс отдельных компонентов, чтобы определить, когда, где, как и что перерабатывать или утилизировать на основе данных о состоянии объекта и исторических данных обслуживания. Чтобы максимизировать выгоды от повторного использования изделия/компонентов, необходимо учитывать затраты на переработку и разборку, стоимость и оставшийся ресурс компонентов. Жизненный цикл оборудования (Рисунок 1.10.1).

Из-за различных целей и задач данные, генерируемые на разных этапах всего жизненного цикла объекта, могут образовывать информационный островок между различными фазами жизненного цикла изделия [188].

Существует множество дублирующих друг друга данных на разных этапах жизненного цикла оборудования. Эти дубликаты данных могут привести к значительному расходу ресурсов (информационных) и к проблемам с обменом данными. Взаимодействие и интеграция между анализом больших данных и различными действиями на протяжении всего жизненного цикла объекта практически отсутствуют. Поэтому анализ данных и фактический производственный процесс нельзя проводить параллельно.

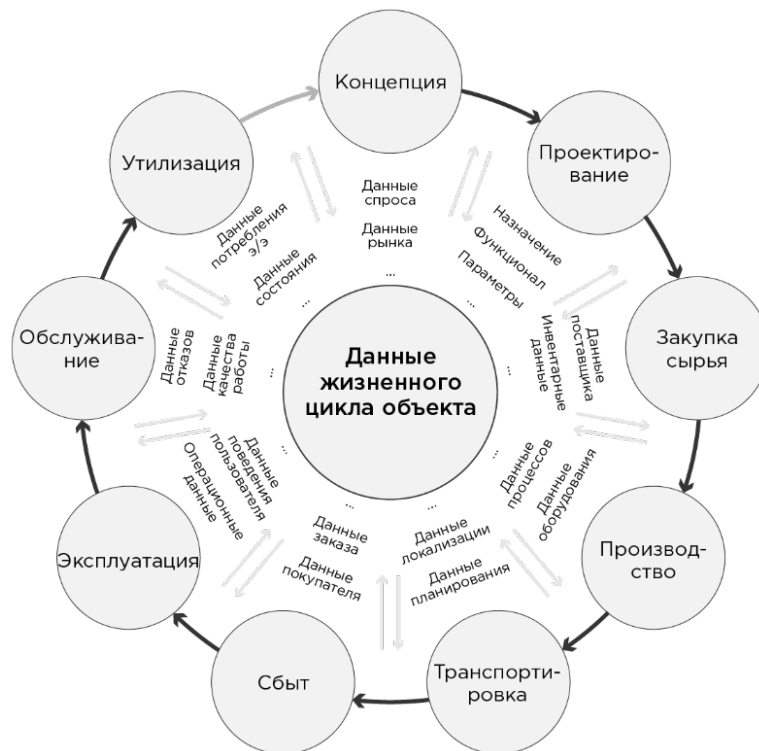


Рисунок 1.10.1 – Данные жизненного цикла установки/оборудования

Возможности прогнозирования состояния и остаточного ресурса основываются на больших данных (*Big Data*) (Рисунок 1.10.2). Данная технология реализует возможность собирать и обрабатывать объемы данных, поступающих из разнородных источников от технологических процессов, объектов и оборудования в реальном времени.

Цифровые системы защиты, мониторинга позволяют выстраивать защитные функции реагирования на уже развивающийся дефект, тогда как методы и средства диагностики расширяют возможности до определения вида и уровня развивающегося дефекта и дают возможность предсказывать выход из строя до нескольких месяцев. Накопление и анализ больших данных из всех уровней

управления остаточным ресурсом дает возможность вывести предсказания на новый уровень, а интеграция с данными из других сервисов и систем может открыть возможность предсказывать не только уровень и вид, но и причину дефекта, что выводит систему ТОиР в более эффективную зону функционирования.

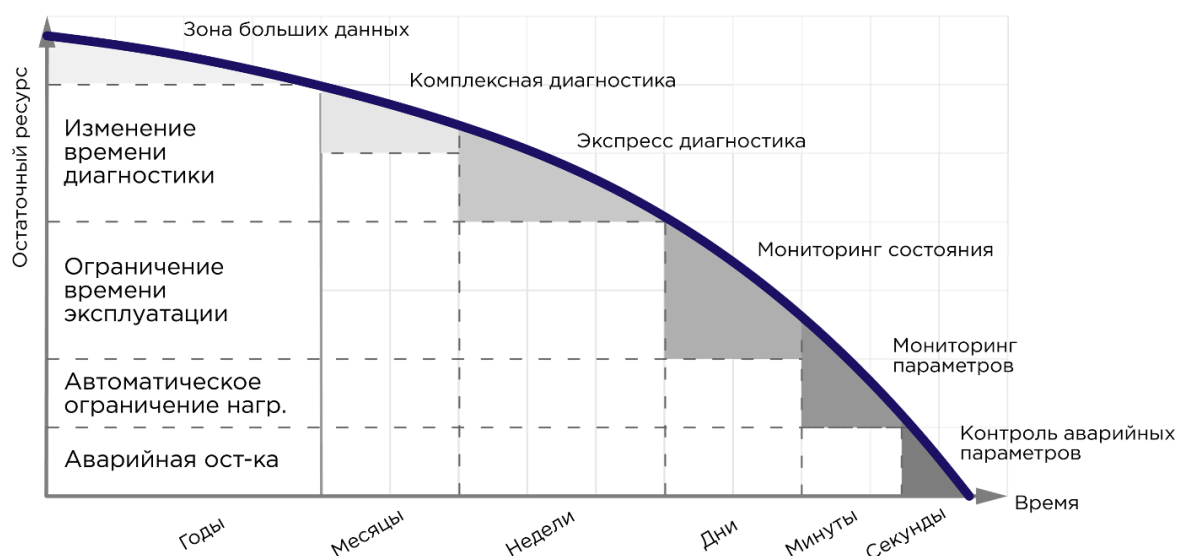


Рисунок 1.10.2 – Управление остаточным ресурсом на основе больших данных

1.10.1 Роль цифрового двойника в повышении безопасности и эффективности процессов

Сегодня ЦД привлекает все больше и больше внимания. *Garther* классифицировал ЦД как одну из 10 главных стратегических технологических тенденций на 2018-2022 годы [311]. Также к перспективной относится применение технологии для дублирования или частичной замены человека, как в реальном, так и в виртуальном мире.

К уровням ЦД можно отнести:

- уровень узла или детали, например ротор и его подшипник;
- уровень оборудования, например двигатель или насос;
- уровень системы или блока – это совокупность активов или оборудования, которые вместе выполняют общесистемную или сетевую функцию, например ЭМО (асинхронный двигатель, сопряженный с насосом в составе автоматизированного электропривода);

– ЦД процесса – совокупность моделей, образующих цифровой двойник процесса способный реагировать на изменение технологических параметров и внешних факторов;

– ЦД на уровне системы можно рассматривать как интеграцию нескольких цифровых двойников отдельных процессов, которые взаимодействуют друг с другом.

ЦД представляют из себя не только данные, но и включают в себя алгоритмы, которые описывают их реальную копию и определяют действия в производственной системе на основе этих обработанных данных [233].

Результаты анализа литературы показывают, что работ именно о цифровом двойнике (*Digital Twin*) гораздо меньше, чем о цифровых моделях (*Digital Models*) и цифровых тенях (*Digital Shadows*); кроме того, на основании приведенных определений ЦД в любом контексте можно определить общее понимание цифровых двойников как цифровых аналогов физических объектов. В этих определениях термины Цифровая модель, Цифровая тень и Цифровой двойник часто используются как синонимы [219].

В зависимости от уровня интеграции данных между цифровым и физическим аналогами, предлагается следующая классификация цифровых представлений для ЭМО в ЭТК ГиНГП:

– Цифровая модель – это цифровое представление ЭМО, которое не использует никакой формы автоматического обмена данными между физическим оборудованием и цифровыми представлением (моделью ЭМО). Цифровое представление может включать в себя несколько моделей объекта, отвечающих за разные уровни. Эти модели могут включать, но не ограничиваются имитационными моделями систем передачи электроэнергии, математическими моделями переходных процессов электрических машин, систем управления электропривода механизмов или любыми другими моделями физического объекта, которые не используют какую-либо форму автоматической интеграции данных. Цифровые данные существующих ЭМО могут использоваться для разработки таких моделей, но весь обмен данными осуществляется вручную (Рисунок 1.10.3).

Изменение состояния физического ЭМО не оказывает прямого влияния на цифровой объект и наоборот.

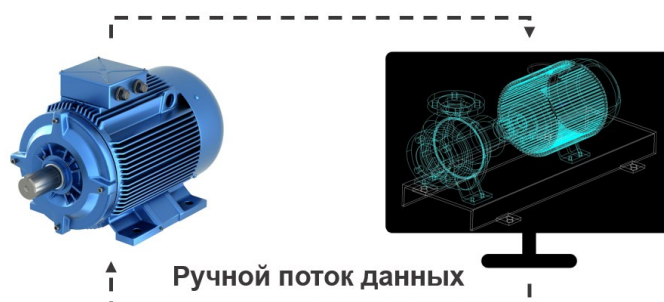


Рисунок 1.10.3 – Поток данных в цифровой модели ЭМО

– Цифровая тень. Дополнительно существует автоматизированный односторонний поток данных между состоянием физическим и цифровым ЭМО (Рисунок 1.10.4), можно назвать такую комбинацию цифровой тенью. Изменение состояния физического объекта приводит к изменению состояния цифрового объекта, но не наоборот.



Рисунок 1.10.4 – Поток данных в цифровой тени

– Цифровой двойник. Если в дальнейшем потоки данных между существующим физическим объектом и цифровым объектом полностью интегрированы в обоих направлениях, его можно назвать «цифровым двойником» (Рисунок 1.10.5). В такой комбинации цифровой объект может также действовать как система, управляющая поведением или воздействиями на физический объект. Также могут быть физические или цифровые объекты вызывающие изменения состояния в ЦД, при этом изменение состояния физического объекта напрямую приводит к изменению состояния цифрового объекта и наоборот.



Рисунок 1.10.5 – Поток данных в ЦД

Обработка данных – самая сложная часть поскольку поведение ЭМО в составе ЭТК ГиНПП трудно описать и предсказать в математических уравнениях, учитывая одновременно все воздействующие факторы.

Из-за сложности многие исследователи изучают процессы производств, используя моделирование систем дискретных событий. Однако схема размещения элементов и оборудования – не единственная проблема производственного проектирования. К примеру, на при добыче нефти в расчетах комплексно не учитывается загрузка оборудования, количество машин, состояние приводных механизмов, параметры бурения, поддержания давления пласта, извлечения, состояния среды, транспортировки, проектирование логистики и расчет ее эффективности и др. Эти комплексы трудно представить с помощью традиционных алгоритмов и моделей или просто визуализировать с помощью техники виртуальной реальности [87].

Таблица 1.10.1 отражает, как понимают технологию известные компании.

Таблица 1.10.1 – Мнение 8 известных компаний о ЦД [233]:

Наименование компании	Тезис
<i>GE (General Electric)</i>	Благодаря интеграции физического оборудования и аналитических методов, машины тестируются, отлаживаются и оптимизируются в виртуальной среде
<i>PTC</i>	Процесс PLM распространяется на следующий цикл проектирования, чтобы создать замкнутый процесс проектирования изделия и помочь в прогнозном обслуживании изделия
<i>Siemens</i>	Основываясь на модели, построенной на постоянном анализе данных во всех аспектах жизненного цикла объекта, некоторые из реальных операций точно и достоверно моделируются

Продолжение таблицы 1.10.1

<i>Oracle</i>	Посредством виртуальных моделей устройств и объектов моделируются реальные сложности физических объектов, а идеи проецируются в приложения
<i>ANSYS</i>	Сочетание выдающихся возможностей моделирования с мощными возможностями анализа данных помогает предприятиям получить стратегическое представление
<i>Dassault</i>	С помощью экспериментальной 3D-платформы дизайнеры и клиенты могут взаимодействовать с объектом во время проектирования объекта или производственного процесса, чтобы понять, как объект работает
SAP	Благодаря созданию оцифрованных моделей, разработка продуктов и инновации продвигаются на основе сбора и анализа данных в режиме реального времени
Altair	Благодаря ведущим технологиям виртуального моделирования возможно создание виртуальных моделей с несколькими физическими настройками, чтобы объект имел лучшие характеристики

В начале 2021 года автором был проведен анализ публикационной активности и тематического поля по теме применения ЦД (Рисунок 1.10.6).

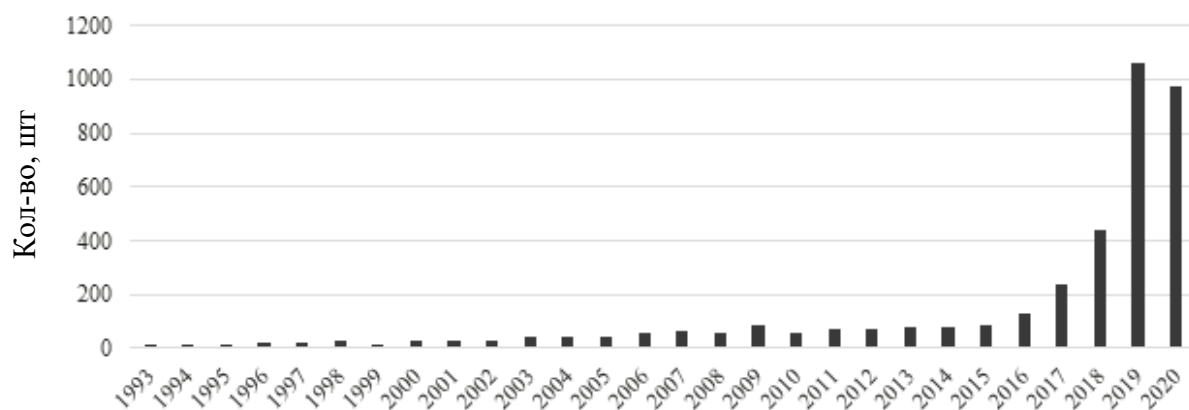


Рисунок 1.10.6 – Публикационная активность по теме ЦД, результаты поиска в БД Scopus, 2020 г.

Большая часть (55 %) рецензируемой литературы относится к типу «концепция». Важно отметить, что некоторые из них содержали краткие тематические исследования, но их основные части состоят из разработки концепции и описания. Тем не менее, большая часть концепций показывает, что исследования, касающиеся ЦД, находятся в зачаточном состоянии, и многие исследователи в настоящее время начинают выводить соответствующие

концепции в качестве первого шага к применению ЦД на практике. Тем не менее, 26 % проанализированных публикаций относятся к категории тематических исследований, где основное внимание в докладах уделяется описанию самих тематических исследований, а также обсуждению их результатов.

Что касается уровней интеграции, большинство публикаций классифицируются как цифровые тени (35 %) и цифровые модели (28 %). Хотя в большинстве работ непосредственно использовался термин ЦД, только 18 % из них действительно описывают ЦД с двунаправленной передачей данных. Таблица показывает, что относительное количество тематических исследований уменьшается с конкретизацией уровня интеграции от цифровых моделей к ЦД. На 2018 год существовало лишь одно тематическое исследование, касающееся ЦД, которое было реализовано в лабораторной среде [199], на 2020 год (момент проведения литературного анализа) количество лабораторных реализаций увеличилось незначительно (Рисунок 1.10.7).

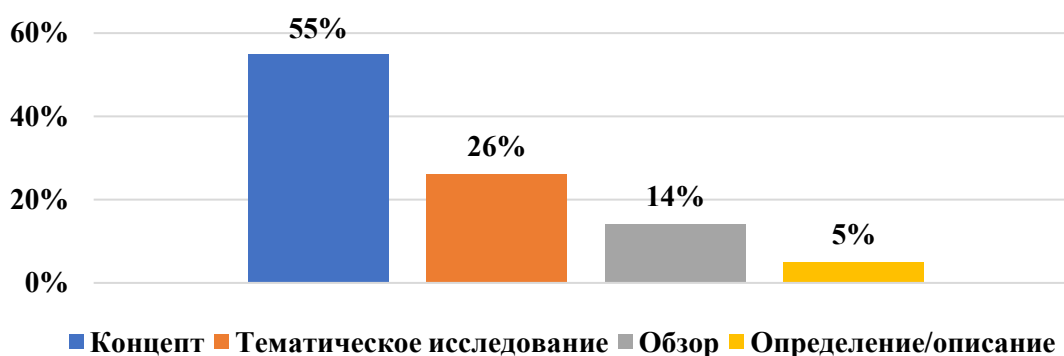


Рисунок 1.10.7 – Распределение публикаций по типам

Есть некоторые обзоры, которые классифицируются как ЦД, так как предполагается двунаправленный обмен данными. Таблица 1.10.2 также показывает, что в классе моделей и теней уже есть много концептуальных документов, но не так много концепций ЦД [277], что также подтверждает, что не хватает концептуальной основы [240].

Таблица 1.10.2 – Количество совпадений в базах данных в соответствии с условиями поиска

	AI SeL	IEEEExplore	J STOR	Science-Direct	SpringerLink	Taylor & Francis
«Installed base management» AND architecture AND (manufacturing OR industrial)	7	1	0	1	4	0
«Asset management» AND architecture AND (manufacturing OR industrial)	204	38	258	943	1747	441
«Inventory management» AND architecture AND (manufacturing OR industrial)	244	28	160	1164	1528	683
Architecture AND «digital twin»	2	7	1	78	92	5
Architecture AND «digital shadow»	2	1	5	23	64	5

Большинство анализируемых публикаций сфокусировано на планировании и контроле производства. Вторая по количеству публикаций область – это обслуживание, в частности обслуживание на основе условий, но в большинстве речь идет о сопровождение данных объекта в течение его жизненного цикла в соответствии с цифровыми моделями и тенями. Некоторые из публикаций не фокусируются на конкретной области внутри производства, поэтому они имеют дело с ЦД в более широком смысле и поэтому классифицируются как «производство в целом».

Таким образом, текущая литература в основном состоит из концептуальных документов в классе цифровых теней и сосредоточена на планировании производства. Отчетливо прослеживается необходимость дальнейших исследований в концептуальной разработке основ формирования и функционирования ЦД [321]. У ЦД есть значительные перспективы в качестве приложений и сервисов (программных модулей) в промышленности, но все еще не

хватает исследований, которые применяют эти концепции на практике особенно в условиях ГиНГП (Рисунок 1.10.8) [301].

Как указывалось ранее, более трех четвертей отказов на ГиНГП составляют отказы ЭМО, и, соответственно, уровень надежности и безопасности технологических процессов во многом определяется их техническим состоянием. В свою очередь наличие дефектов в элементах ЭТК, например, система электропривода оказывает влияние как на параметры системы энергообеспечения, так и на конечный механизм, приводимый в движение, справедлив и обратный эффект.

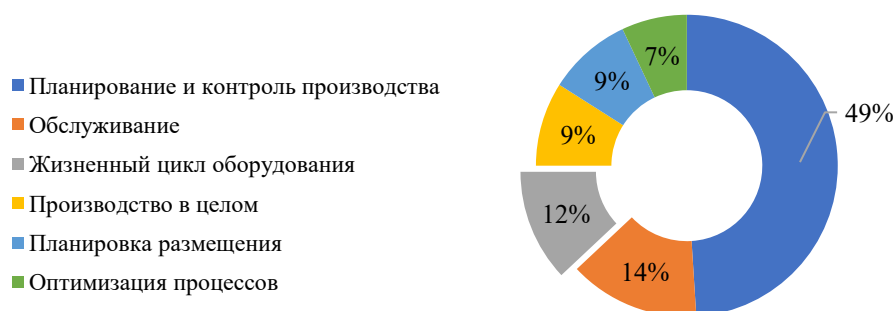


Рисунок 1.10.8 – Области исследований цифровых двойников

Таким образом, система энергообеспечения, электрический привод и связанный с ним исполнительный механизм в ЭТК ГиНГП являются звеньями для формирования архитектуры и методологических подходов создания ЦД для управления безопасностью и эффективностью эксплуатации. Поэтому особое внимание необходимо уделять подходам к построению архитектур и алгоритмов, которые впоследствии образуют ЦД в части технологической цепочки «первичная энергия – генерация – система электроснабжения – электрический привод – приводной механизм – технологический процесс».

При этом в составе ЦД цифровая копия ЭМО должна предоставлять доступ к следующим функциям (Рисунок 1.10.9):

- аналитические и динамические модели ЭМО;
- информационные модели компонентов;
- 3D визуализация моделей ЭМО и его компонентов;
- пространственно-временные модели компонентов ЭМО;

- сбор и обработка данных с физического оборудования и процессов;
- программные средства контроля и алгоритмы управления;
- виртуальная коммуникационная сеть.

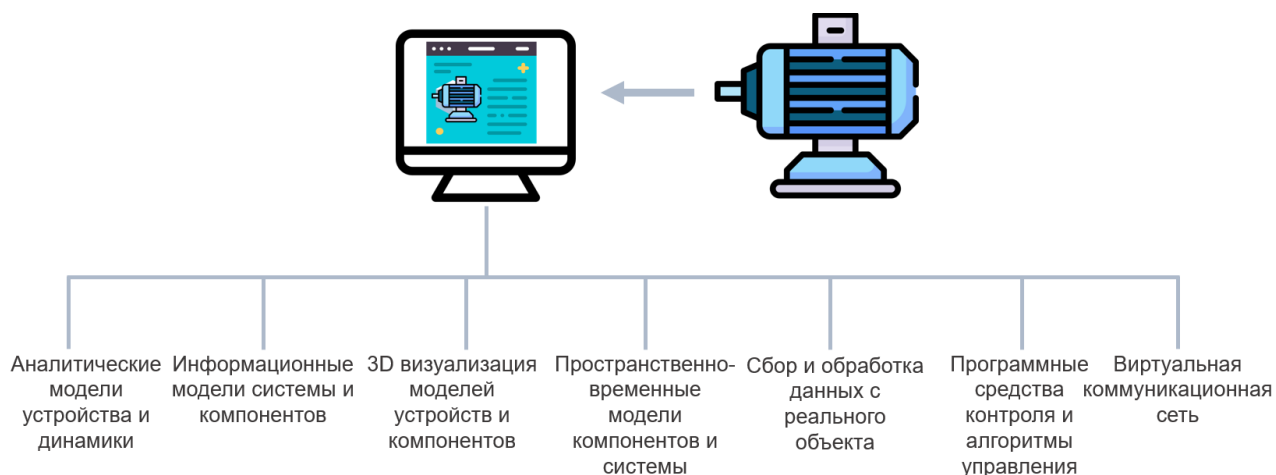


Рисунок 1.10.9 – Функционал цифровой тени ЭМО

Для реализации перечисленных функций ЦД должен оперировать большими данными и автоматически определять на основе базы знаний, регламентных значений и другой информации границы фиксируемых сигналов и параметров. Одной из важнейших функций является умение прогнозировать дальнейшее поведение ЭМО, подбирать оптимальные параметры работы, анализировать и прогнозировать ТС, и на основе прогноза, влиять на загрузку оборудования и программы ТОиР. Для реализации этих функций необходимо находить зависимости сигналов от комплекса параметров в больших данных собранной информации. Осуществлять быстрый поиск информации о причинах поломок, видах дефектов с целью управления техническим состоянием посредством влияния на параметры, от которых оно зависит.

1.11 Применение средств искусственного интеллекта в системах управления жизненным циклом эксплуатации ЭМО

ГиНГП в рамках цифровой трансформации стремятся перейти к прогнозированию состояния своих активов, однако, для каждой единицы оборудования технически сложно и дорого реализовать систем мониторинга и диагностики, что не способствует изменению существующей системы ТОиР [16].

Стационарные системы диагностики эффективны для крупных объектов с однотипными приводами, которые имеют постоянную загрузку и скорость вращения. В настоящее время нет готовых унифицированных систем, обеспечивающих достоверный контроль состояния и управления техническим состоянием ЭМО во всем спектре их применения [72]. Ряд существующих экспертных технических решений направлены на специализированные машины и оборудование большой мощности и основаны на комбинации нескольких методов диагностики (спектральный, вибрационный и тепловизионный анализ). Значительная доля повреждений связана с нештатными условиями эксплуатации электропривода, переходными процессами, а также обусловлена случайным характером нагрузки и изменением управляющего воздействия [73]. Поэтому применяемые диагностические методы должны обладать избыточностью информации и широким набором диагностических параметров. Существенное влияние на жизненный цикл оборудования оказывает как проектный, так и обслуживающий персонал при проектировании, оценке технического состояния и формировании рекомендаций по дальнейшей эксплуатации.

В системах мониторинга информация представлена сигналами, поступающими от измерительных преобразователей. Каждый из сигналов представляет собой зависимость какого-либо параметра, характеризующего ТС объекта, от времени. В общем случае эти сигналы являются непрерывными нестационарными функциями времени. Традиционно используемый для целей обработки сигналов аппарат непрерывного преобразования Фурье позволяет перейти от временного представления функции к частотному, что в ряде случаев позволяет выявить различные виды повреждений.

В дополнение к классическим методам анализа, которые основаны на изучении частотного спектра сигналов, последние 20 лет активно развиваются методы искусственного интеллекта, такие как нечеткая логика, нейронные сети и приближенные множества и др. [136]. В отличие от подходов, основанных на детерминированных моделях, методы искусственного интеллекта используют функции вероятности для обработки неопределенности, неточности, нелинейных

систем и неполных данных [242, 246]. В таблице 1.11.1 представлен проведенный автором анализ классических методов диагностики и методов диагностики и мониторинга на основе средств ИИ.

Таблица 1.11.1 – Методы, применяемые для мониторинга и обнаружения неисправностей

Характеристики	Методы, основанные на данных		Методы, основанные на предварительных знаниях или моделях		
	Статистические методы	ИИ	Оценка параметров	На основе наблюдений	Комплексный
Простота получения результата	Легко	Легко	Относительно легко	Сложно	Сложно
Способность к диагностике	Удовлетворительная	Очень хорошая	Хорошая	Хорошая	Хорошая
Скорость диагностики	Быстро	Быстро	Быстро для мгновенных отказов, медленно для развивающихся дефектов	Быстро для мгновенных отказов	Быстро для мгновенных отказов
Шумоподавление	Хорошее	Очень хорошее	Слабое	Слабое	Слабое
Способность к обобщению	Слабая	Слабая	Хорошая	Хорошая	Хорошая
Обработка нелинейности	Хорошая	Отличная	Удовлетворительная	Удовлетворительная	Удовлетворительная
Типы устраняемых отказов	В основном отказы технологических компонентов или оборудования	-	В основном отказы приводов и датчиков	-	-
Использование в промышленности	Преимущественно обогатительные фабрики	Различные области применения	Преимущественно машиностроительная и аэрокосмическая промышленность	-	-

Однако стоит учесть, что методы искусственного интеллекта применительно к задачам диагностики и прогнозирования технического состояния ЭМО не могут

быть рассмотрены отдельно от методов, основанных на анализе электрических параметров. Их комбинация является шагом вперед в развитии теории диагностики, а применение средств искусственного интеллекта (ИИ) необходимо также базировать на обработке сигналов и признаков извлеченных с помощью существующих методов диагностики, таких как, например, БФП. В свою очередь комбинации и использование результатов диагностики необходимо строить с применением нейронных сетей, регрессии опорных векторов, авторегрессии скользящего среднего (*ARMA*) и авторегрессии интегрированного скользящего среднего (*ARIMA*) [234, 341].

На основе литературных источников, представленных в этом и предыдущих разделах автором изучены некоторые наиболее популярные в последнее время модели обнаружения отказов ЭМО, основанных на машинном обучении (Таблица 1.11.2).

Таблица 1.11.2 – Анализ моделей диагностики ЭМО

Алгоритм машинного обучения	Преимущества	Недостатки
Машина опорных векторов (<i>SVM</i>)	1. Высокая точность и эффективность для извлечения функций. 2. Точное обнаружение ранних признаков системных отказов	1. Не подходит для разреженных данных и данных большого размера. 2. Требуются предварительные знания для выбора ядра.
Сверточная нейронная сеть (<i>CNN</i>)	1. Высокая точность и эффективность для извлечения функций.	1. Требуется большой набор обучающих данных.
Глубокая нейронная сеть (<i>DNN</i>)	1. Высокая точность обнаружения отказов 2. Подходит для обнаружения множественных отказов.	1. Трудно интерпретировать модель «черного ящика».
Глубокий автокодировщик	1. Точное и эффективное обнаружение неисправностей	1. Вычислительная стоимость обучения модели, (дорого).
Долговременная кратковременная память (<i>LSTM</i>)	1. Способность контролировать большой объем данных большой размерности с хорошей точностью. 2. Способность выполнять обнаружение отказов без дорогостоящих экспертных знаний.	1. Вычислительные затраты. 2. Склонность к переобучению

Сводный анализ моделей классификации машинного обучения в приложениях диагностики ЭМО, выполненный по проведенному литературному обзору (Таблица 1.11.3).

Таблица 1.11.3 – Анализ требований к данным моделей машинного обучения для диагностики, оценки и прогнозирования остаточного ресурса

Алгоритм машинного обучения	Преимущества	Требования к данным/недостатки
Дерево решений	Высокая точность с большой эффективностью обучения	Не устойчив к шуму данных
Случайный лес	1. Подходит для дискретной классификации 2. Высокая точность оценки.	1. Более сложная, чем модель Дерево решений 2. Трудно интерпретировать модель «черного ящика»
Усиленное дерево	Высокая точность и отсутствие переобучения	Чрезмерная чувствительность к выбросам в обучающем наборе данных.
Алгоритм К-средних	Высокая точность и эффективность	1. Не подходит для данных большого размера. 2. Не устойчив к шуму данных.
Классификация опорных векторов	1. Высокая эффективность, экономия времени до двух порядков по сравнению с традиционными методами 2. Устойчивость к вариациям результатов, высокая точность прогнозов 3. Устойчивость к шуму набора данных.	1. Не подходит для разреженных данных и данных большого размера. 2. Требуются предварительные знания для выбора ядра.
Вектор релевантности	Высокая точность классификации	Не устойчив к шуму данных
Линейный дискриминантный анализ	Высокая точность прогнозов.	Не подходит для нелинейных систем
Байесовская сеть	1. Доступно для сложной системы с высокой точностью и эффективностью 2. Подходит для дискретной классификации и удовлетворительной оценки	Требует предварительное знание приложения.

Продолжение таблицы 1.11.3.

Классификация процессов по Гауссу	1. Подходит для сложных систем 2. Превосходная вычислительная эффективность	1. Требуются предварительные знания для выбора ядра. 2. Низкая вычислительная масштабируемость с размером обучающего набора данных.
Глубокая нейронная сеть	Точная классификация в задачах большого размера.	Вычислительная стоимость обучения модели (дорого).
Составной автоэнкодер	1. Устойчив к входному шуму 2. Высокая точность	Вычислительная стоимость обучения модели (дорого).
Рекуррентная нейронная сеть	Высокая точность прогнозирования по сравнению с традиционными параметрическими моделями.	Страдает проблемой исчезающего градиента.

Многие промышленные объекты и процессы имеют несколько датчиков и высокочастотный съём данных для мониторинга их состояния [246], что позволяет собирать большие объёмы данных для анализа и прогнозирования. Однако существует особая проблема для высоконадёжных систем, поскольку в их наборах данных будет содержаться очень мало случаев отказа. Такой несбалансированный набор данных затрудняет применение стандартных алгоритмов машинного обучения для прогнозирования отказов, поскольку такие алгоритмы часто зависят от большого количества случаев отказа для обучения моделей.

Также стоит отметить, что значительное количество сигналов при диагностике подвергаются предварительной фильтрации, обработке и разложению. За последние 20 лет было предложено множество подходов к анализу сигналов ЭМО, и каждый подход имеет свои характеристики, преимущества и недостатки (Таблица 1.11.4) [28, 223, 305, 230].

Таблица 1.11.4 – Распространённые методы обработки сигнала для обнаружения неисправностей ЭМО

Название	Описание	Характеристики
<i>FFT</i> – быстрое преобразование Фурье (БПФ)	Преобразует сигнал из его исходной области (часто временной или пространственной) в представление в частотной области и наоборот. БПФ получается путём разложения последовательности значений на составляющие с разными частотами.	Смешивание мод, не устойчив к переходным процессам, дискретизации и шуму, нет возможность выделения трендов

Продолжение таблицы 1.11.4.

<p><i>EMD</i> – эмпирическая модовая декомпозиция</p>	<p>Представляет собой итерационную вычислительную процедуру, в результате которой исходные данные (непрерывный или дискретный сигнал) раскладываются на эмпирические моды или внутренние колебания, которые вычисляются в ходе процесса.</p>	<p>Смешивание мод, возможность потери частоты, амплитуды и образование ложных экстремумов мод. Необходимость знания количества мод при разделении.</p>
<p><i>VMD</i> – вариационная модовая декомпозиция</p>	<p>Цель метода состоит в том, чтобы разложить входной сигнал с действительным знаком на дискретное число подсигналов (мод), которые обладают определенными свойствами разреженности при воспроизведении входа. Априорная разреженность каждого режима выбирается как его ширина полосы в спектральной области. Каждая мода концентрируется вокруг центральной пульсации, которую необходимо определить вместе с разложением.</p>	<p>Смешивание мод, возможность потери частоты, амплитуды мод. Вычислительная сложность.</p>
<p><i>HHT</i> – преобразование Гильберта- Хуанга</p>	<p>Линейный, инвариантный к сдвигу оператор H, который отображает все одномерные косинусные функции в соответствующие им синусоидальные функции.</p>	<p>Смешивание мод, возможность потери частоты, амплитуды и образование ложных экстремумов и смещений мод.</p>
<p><i>WT</i> – вейвлет- преобразование</p>	<p>Преобразованный сигнал предоставляет информацию о времени и частоте. Таким образом, вейвлет-преобразование содержит информацию, аналогичную кратковременному преобразованию Фурье, но с дополнительными особыми свойствами вейвлетов, проявляющимися в разрешении во времени на более высоких частотах анализа базисной функции.</p>	<p>Возможная потеря амплитуды мод. Влияние параметров способа на результат. Низкая устойчивость к дискретизации и шуму.</p>
<p><i>SVD</i> – сингулярное разложение</p>	<p>Сингулярное разложение матрицы позволяет выделить наиболее значимые составляющие временного ряда и отсеять случайные возмущения, путем группировки компонент и восстановления исходного временного ряда без потери информации.</p>	<p>Образование ложных экстремумов и смещений мод. Вычислительная сложность.</p>

1.12 Концепция перехода к управлению жизненным циклом эксплуатации ЭМО на основе цифровых технологий

Методы, основанные на искусственном интеллекте, являются одним из последних эволюционных этапов науки, которые применяются для мониторинга, обнаружения и диагностики неисправностей в ЭМО. Благодаря промышленному интернету вещей сигналы собираются и обрабатываются для последующего использования в сложных комплексных математических моделях. Тем не менее, редко можно найти случаи, когда ИИ является частью системы, применяемой в области управления каким-либо из этапов жизненного цикла ЭМО. То есть существующие и рассматриваемые системы не обладают способностью учиться, отвечать на вопросы голосовых команд, находить и определять местоположения необходимых людей и оборудования для подкрепления экспертными знаниями, формировать графики технического обслуживания и обучения персонала, решать проблемы с целью минимизации негативного воздействия на окружающую среду и технические системы [334, 338].

Повышение безопасности и эффективности эксплуатации ЭМО возможно путем перехода на ПСТОиР и интеллектуальное управление всеми этапами жизненного цикла эксплуатации. Комплексы децентрализованных систем диагностики, оценки и прогнозирования остаточного ресурса позволят получить следующие эффекты:

- Снижение затрат на ремонт, вызванный поломкой;
- Увеличение доступности или срока полезного использования ЭМО;
- Сбор данных в экстремальных климатических ситуациях и формирование критических эксплуатационных параметров;
- Повышение качества планирования работ по техническому обслуживанию;
- Удаленный и автоматический мониторинг;
- Защита отдельных узлов и деталей оборудования;
- Своевременное обнаружение развивающихся дефектов;

- Накопление знаний о поведении ЭМО;
- Минимизация действия по обслуживанию и ремонту;
- Снижение влияния на ТС структурных элементов ЭТК.

Одной из основных особенностей построения интеллектуальных систем является непрерывный мониторинг для извлечения своевременной информации и знаний, связанных с различными видами дефектов и отказов. Перспективной является разработка алгоритмов и информационных агентов, способных формировать ЦД. ЦД, ориентированный на процесс управления жизненным циклом эксплуатации, способен устанавливать зависимости видов и уровней дефектов ЭМО от изменения диагностических параметров различной физической природы, а также флуктуации внешних факторов и воздействий, обусловленных окружающей средой, персоналом, влияния других элементов ЭТК ГиНГП на основе машинного обучения и средств ИИ.

Помимо вопросов волатильности цен на энергоресурсы и геополитической ситуацией существует ряд других рисков и ограничений, связанных с концентрацией технологического развития в промышленности, ограниченной традиционными базовыми технологиями.

На сегодняшний день критерием принятия решения о выводе ЭМО в ремонт является достижение наблюдаемыми параметрами критических значений, при этом не проводится оценка энергетических затрат, которые связаны с циклом эксплуатации. Однако в процессе эксплуатации помимо энергии, для высокоэффективных ЭТК включающих ЭМО требуется большое количество природных ресурсов, таких как железо, медь, материалы с постоянными магнитами и другие полезные ископаемые, а также энергия, необходимая для извлечения, обработки, производства и распределения этих материалов. В качестве метода экономической оценки, учитывающего этапы жизни оборудования от добычи и переработки материалов, производства, распределения, использования, ТОиР, а также утилизации или переработки применяется оценка стоимости жизненного цикла (*Life-Cycle Costing, LCC*). Актуальным является вопрос оценки воздействия на жизненный цикл этапов использования, ремонта и обслуживания, поскольку на

них суммарно выпадает до 95% всех энергетических затрат. В составе ЭМО электрические машины, такие АДКЗ, как правило, рассчитаны на срок службы 15-20 лет без капитального ремонта в условиях их нормальной эксплуатации. Потребность в энергии и экологические отходы, связанные с хранением и потреблением, включаются в стадию эксплуатации. На этом этапе особенно важна эффективность работы электрических машин и приводного механизма и их энергетические характеристики.

Цель оценки жизненного цикла – сравнить весь спектр затрат, отнесённых к ЭМО, путём количественной оценки всех исходных данных, потоков энергии и материалов для оценки того, как они влияют на затраты. Эту информацию необходимо использовать для совершенствования процессов и обеспечения надёжной основы для принятия обоснованных решений, а также для управления стратегиями технических воздействий, техническим обслуживанием и ремонтом.

Однако для создания надёжной и эффективной модели жизненного цикла оборудования необходимо иметь инструменты, помогающие определить момент времени, когда оборудование требует замены на основании составленного заранее плана использования, в котором будет обозначена фаза снижения стоимости владения и увеличения эксплуатационных расходов с учётом энергетических потерь и воздействия на окружающую среду [191, 262].

Необходимо отметить, что эффективность принятых решений по управлению ТОиР может рассматриваться как в диапазоне планов ремонта, так и на более длительном промежутке, сопоставимом со всей длинной этапа эксплуатации, когда становятся очевидными статьи расходов на его обслуживание и дополнительные потери электроэнергии и убытки от возможного простоя оборудования.

Жизненный цикл ЭМО в общем случае включает в себя 4 стадии: проектирование, производство, техническая эксплуатация и утилизация. Соответственно, управление стоимостью жизненного этапа эксплуатации предполагает снижение затрат на рассматриваемом этапе при условии обеспечения работоспособности самого оборудования и сопряжённого механизма или процесса с соответствующим выпуском продукции. Техническая эксплуатация – наиболее

длительная стадия жизненного цикла и одновременно – самая дорогостоящая, поскольку включает потребление энергии на протяжении всего срока службы и меры по поддержанию работоспособности ЭМО, поэтому необходимо в оценке стоимости жизненного цикла учитывать фактор временной стоимости денег и потенциальный рост стоимости электроэнергии и эквивалентных вредных выбросов.

ТОиР является ключевым звеном интеллектуального производства, поэтому концепция интеллектуального управления жизненным циклом эксплуатации на основе комплекса цифровых технологий и передовых стратегий ТОиР обеспечивает безопасное и эффективное управление ЭМО в ЭТК с учетом аспектов цифровизации. Автором в качестве обобщения концепций управления сформированы этапы перехода ТОиР для увеличения вклада в создание ценностей устойчивого развития и интеллектуального производства (Рисунок 1.12.1). Предлагаемая структура этапов ориентирована на постоянное совершенствование и динамическую адаптацию управляющих воздействий. Модель управления различает три уровня управления: нормативный, стратегический и оперативное управление.



Рисунок 1.12.1 – Этапы перехода к управлению жизненным циклом эксплуатации на основе цифровых технологий

Ориентация на динамическую стратегию фокусируется на предотвращении отказов за счет ранней идентификации дефектов (повышение ремонтпригодности), ПСТОиР, а также анализа энергетической и экологической эффективности.

Аспект бережливого производства реализуется за счёт повышении эффективности управления персоналом и запасными частями. Для внедрения необходим комплексный набор инструментов управления, таких как планирование, организация, информация, контроль и управление персоналом, цифровые технологии.

В фокусе управления создаются междисциплинарные группы, которые несут ответственность за эксплуатацию и техническое обслуживание на определенном интервале времени и территории, группы экспертов-респондентов для структурирования информации и мозговых штурмов, анкетирования и поддержки алгоритмов ИИ. Структурная организация на вершине этапов динамически адаптируется к меняющимся условиям, при этом вклад групп в безопасность и эффективность измеряется и визуализируется.

Наличие цифрового контроля обеспечивает соответствующее лидерство и мотивацию за счёт:

- доступа в актуальном состоянии к полным основным данным обслуживания и ремонта;
- динамического планирования мощности технологических процессов и оборудования, учитывающего их критичность;
- инициирования, внедрения, мониторинга и обратной связи по каждому действию по ТОиР, которая осуществляется с использованием стандартизированной системы и постоянно совершенствуется;
- интеллектуального анализа цифровых данных для определения непроизводительных потерь времени и ресурсов;
- реализации управления непроизводительным временем и временем, не добавляющим ценности с целью их сокращения.

Например, путем видео анализа с помощью средств дополненной реальности процессов технического обслуживания и ремонта выявляются действия, не добавляющие ценности. Действия, которые не способствуют повышению безопасности, надежности или производительности, должны быть сведены к минимуму.

Целевая система регулирует цели обслуживания в соответствии с содержанием, размерами и периодом времени, которые вытекают из целей предприятия и ориентированы на энергетический, экономический, экологический и человеческий факторы.

Задача управления ТОиР заключается в координации и контроле мер воздействия, а также в предоставлении информации для процессов решения проблем и принятия решений. Ключевые показатели эффективности (КПИ) используются для выявления отклонений между целевым и фактическим состоянием [82].

Что касается человеческих ресурсов, нехватка квалифицированных специалистов и демографические изменения представляют собой проблемы для поддержания безопасной и эффективной эксплуатации с учетом роста сложности и количества технических систем на ГиНГП. Поэтому на основе ЦД необходимо реализация подсистем:

- система управления цифровыми знаниями используется для сохранения знаний опытных сотрудников и предоставления их новым;
- система балансировки соотношения методической, общеобразовательной и технической квалификационной деятельности в соответствии с текущими требованиями;
- система персональной и групповой мотивации используется для поддержки потенциала сотрудников и связаны в первую очередь с целевой системой ключевых показателей эффективности процессов.

Управление информацией и данными является важным фактором для цифровых ГиНГП [79, 83]:

- горизонтальная и вертикальная информационная интеграция цифровой системы управления ТООиР;
- Эффективное использование технологических ресурсов (например, систем мониторинга состояния, мобильных устройств, инструментов визуализации и т.д.);
- данные рассматриваются как ресурс и создают новую ценность для ЭМО и для предприятия. Для каждого источника данных определены производитель, владелец и пользователь.

С учётом концепции поэтапного перехода необходимо:

- разработать способы диагностики электромеханического оборудования, которые позволяют дать полное представление о техническом состоянии, видах и уровнях дефектов без остановки и вывода оборудования из эксплуатации, основывающиеся на максимальном использовании электрических параметров и возможности интеграции с системами интеллектуального электроснабжения, не исключая другие виды источников информации;
- разработать методы, позволяющие использовать математические модели электромеханического оборудования, эксплуатационные данные, диагностические признаки и результаты мониторинга для выявления режимов работы, наличия развивающихся дефектов на ранней стадии, а также прогнозирования остаточного ресурса;
- разработать комплекс алгоритмов обработки эксплуатационных данных и диагностических признаков для определения вида повреждения и классификации режимов работы ЭМО в ЭТК;
- определить критерии управления, параметры мониторинга и математические модели, необходимые для учёта взаимного влияния фактического состояния и энергетических потоков структурных элементов систем энергообеспечения и энергопотребления с учётом сценарных условий функционирования и развития ЭТК ГиНПП;
- разработать модель оценки влияния уровня потерь энергии, обусловленных техническим состоянием, на экологичность и

энергоэффективность жизненного цикла эксплуатации электромеханического оборудования для управления системой технического обслуживания и ремонта с учетом взаимного влияния технического состояния структурных элементов ЭТК на уровень энергетической эффективности и безопасности;

– обосновать структуру и принципы функционирования ЦД процесса управления техническими воздействиями на жизненном цикле эксплуатации ЭМО в составе ЭТК ГиНГП;

– разработать комплексную взаимосвязанную структуру программных модулей и их алгоритмы работы в составе распределенной системы управления жизненным циклом эксплуатации ЭМО.

1.13 Выводы по главе 1

1. По результатам проведенного обзора установлено, что ряд экономических, технологических, экологических и правовых факторов как глобального, так локального характера определяют необходимость решения вопросов старения и износа энергетической инфраструктуры, обеспечения энергетической и экологической безопасностей, особую роль в которых играют цифровые технологии и переход к интеллектуальной энергетике. Давление климатической и экологической политики, удорожание себестоимости и неэффективное потребление энергии наиболее существенно влияют на будущее развитие ГиНГП, что определяет требования к их безопасному и эффективному функционированию.

2. Анализ текущего состояния энергетической инфраструктуры включая ЭТК ГиНГП показывает значительный уровень износа как оборудования в системах электроснабжения (до 60%), так ЭМО (до 30%), что приводит к повышению рисков возникновения аварий и к незапланированным простоям технологических процессов, а также дополнительным потерям энергии. В структуре потребления энергоресурсов ГиНГП электроэнергия достигает 80%, а ЭМО является её основным потребителем, его доля достигает 70% от общего потребления в ЭТК, при этом 85-90% от всего ЭМО составляют АДКЗ, что требует

развития и поиска новых методов повышения энергетической эффективности на этапе эксплуатации оборудования.

3. На основе анализа типов отказов ЭМО на ГиНГП и статистики их возникновения установлено, что наибольшее количество отказов возникает по причине дефектов подшипника до 41% и статора до 37% , основными причинами отказов являются неправильное ТОиР до 34% и брак до 20% от общего числа отказов, при этом основными факторами воздействия, приводящими к отказам, являются недостаточное охлаждение и перегрев по причине внутренних дефектов и старения – до 26%, влияние системы электроснабжения – до 20% и окружающая среда – до 13%. Учитывая, что эксплуатация ЭТК в тяжелых условия (климатические, нестационарные и перегрузочные режимы работы, специфика углеводородов) сопряжена с быстрым износом и внеплановым выходом из строя требуется развитие теории, методов и средств управления техническим состоянием ЭМО на ГиНГП.

4. Обоснована целесообразность создания многофакторной системы диагностирования ЭМО на базе анализа электрических параметров, позволяющей проводить как диагностику, так и мониторинг энергетических характеристик, режимов работы и оценивать показатели энергетической эффективности эксплуатации ЭМО. На основе критического анализа существующих методов мониторинга и диагностики технического состояния ЭМО, работающего в тяжелых условиях ГиНГП без вывода оборудования в ремонт, выявлены преимущества методов, построенных на анализе связи механических и электрических дефектов ЭМО с изменениями мгновенных значений тока и напряжения и их спектрального состава.

5. Установлено, что ЭМО является причиной тяжелых аварий, поскольку внезапные отказы и повышенное тепловыделение в условиях агрессивных окружающих сред приводят к возникновению взрывов и пожаров, которые составляют до 23% от всех аварий, а доля экономического ущерба до 35% от общего ущерба. Применительно к специфике ГиНГП выделены четыре уровня для

оценки безопасности эксплуатации, характеризующие возможность возникновения аварии на основе отклонения значений индикаторов от пороговых значений.

6. Предложены ключевые уровни цифровой трансформации ЭТК ГиНГП и технологии для их реализации. На основе анализа применения цифровых технологий в ТОиР сформированы функциональные признаки, обеспечивающие переход к ПСТОиР, реализация которых возможна на основе разработки комплекса методов и алгоритмов обработки эксплуатационных данных и диагностических признаков на основе цифровых технологий. Сформирована концепция поэтапного перехода к интеллектуальному бережливому ТОиР на основе ЦД процесса управления техническими воздействиями реализуемого за счёт комплекса цифровых технологий и передовых стратегий ТОиР, позволяющих обеспечить безопасное и эффективное управление ЭМО на жизненном цикле эксплуатации в ЭТК с учетом аспектов цифровизации.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА, ОБОБЩЕНИЕ И ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Электромеханическое оборудование, включающие автоматизированный электропривод, является конечным звеном в цепочке генерации, транспорта, преобразования и потребления электроэнергии. Высокие энергозатраты в условиях растущего износа ЭМО представляют угрозу внезапной остановки и его не рациональной работы, что сказывается на эффективности и безопасности всего производства. Аварийные ситуации на ГиНПП часто приобретают характер крупных промышленных катастроф, приводят к многочисленным человеческим жертвам, а также неблагоприятным последствиям для общества и имиджа МСК и ТЭК в целом.

На основе критического анализа, выполненного в первой главе в части воздействий, причин и дефектов, а также методов диагностики технического состояния ЭМО, выявлен потенциал использования методов, основанных на анализе электрических параметров, которые исключают такие недостатки, как труднодоступность, чувствительность к изменениям режимов ЭМО. Также с учётом перехода ГиНПП к производственным предприятиям Индустрии 4.0 стратегическими целями компаний являются курс на энергосбережение и внедрение информационных технологий, способных повысить взаимодействие между потребителем и энергосистемой. Увеличение числа цифрового электрооборудования в ЭТК, которое способно создавать новые данные, доступные для анализа, требует комплексного анализа возможностей использования электрических параметров для диагностики и анализа эффективного использования электроэнергии ЭМО и разработки способов диагностики ЭМО, которые позволяют дать полное представление о техническом состоянии, видах и уровнях дефектов без остановки и вывода оборудования из эксплуатации, основывающиеся на максимальном использовании электрических

параметров и возможности интеграции с системами интеллектуального электроснабжения.

2.1 Анализ потерь электроэнергии и мощности в ЭМО

Обобщенный анализ распределения потерь в АДКР для ряда мощностей и отдельно для электрического двигателя мощностью 11 кВт, проведенный на основе данных заводов-изготовителей, представлен на (Рисунок 2.1.1, Рисунок 2.1.2).

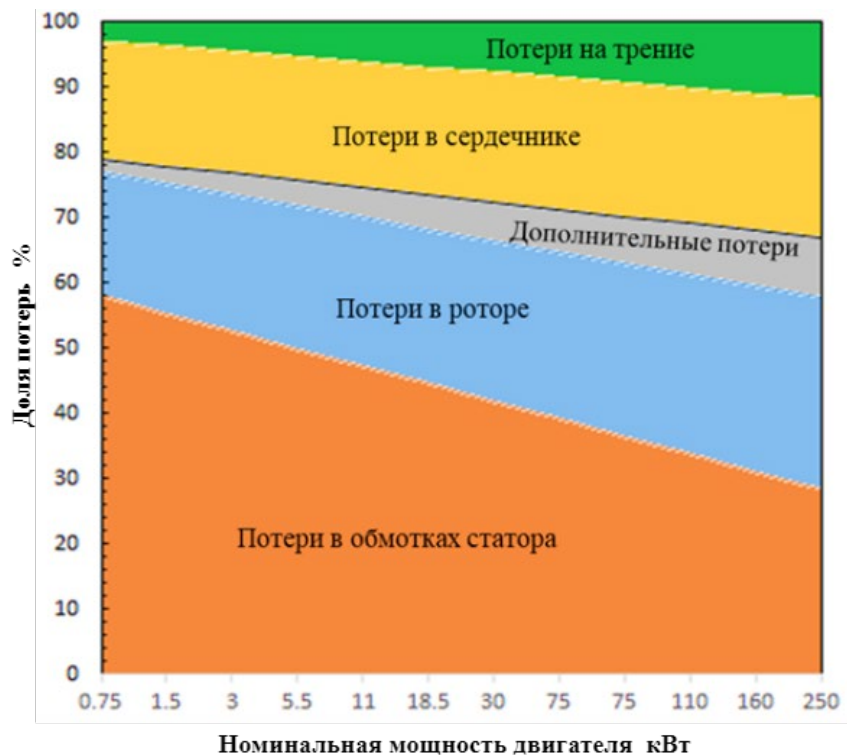


Рисунок 2.1.1 – Обобщенный анализ распределения соотношения потерь в АДКР при различных номинальных мощностях

Для двигателей малой мощности основную долю потерь составляют тепловые потери в обмотке статора, однако по мере увеличения мощности увеличивается доля потерь в роторе и сердечнике, а также потери на трение и дополнительные потери, что обуславливает дополнительные меры по отводу тепла и большему вниманию к потерям на трение и дополнительным потерям, которые в основном зависят от условий эксплуатации [1, 341].

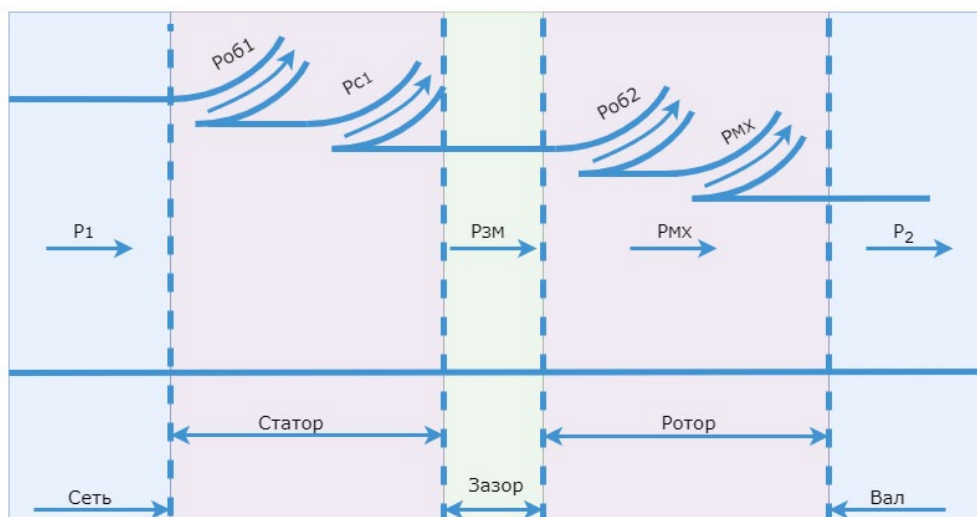


Рисунок 2.1.2 – Структура основных составляющих потерь АДКЗ мощностью 11 кВт

Для моделируемого АД мощностью 11 кВт большой вклад в общие потери двигателя вносят потери в статоре и роторе. ЭМО рассчитано на определенный диапазон потерь и при увеличении суммарных потерь электроэнергии увеличиваются тепловые потери, что негативно сказывается на узлах и в особенности на изоляции [122]. Очевидно, что рост общих потерь и отличие их от номинальных является признаком ухудшающегося технического состояния.

При этом необходимо учитывать также величину текущей нагрузки, поскольку потери на трение и в сердечнике практически не зависят от нагрузки, а в статоре, роторе и дополнительные потери нелинейно увеличиваются (Рисунок 2.1.3). Учитывая влияние фактора зависимости вида потерь от величины нагрузки, диагностическим признаком может являться линейность или нелинейность роста потерь при изменениях величины нагрузки.

Анализ изменения зависимостей КПД и коэффициент мощности $\cos\phi$, характеризующих энергетическую эффективность работы АДКЗР представлен на (Рисунок 2.1.4, Рисунок 2.1.5). Номинальное изменение соотношения потерь при увеличении нагрузки также является опорной характеристикой для анализа отклонений от базовых номинальных значений, установленных заводом изготовителем.

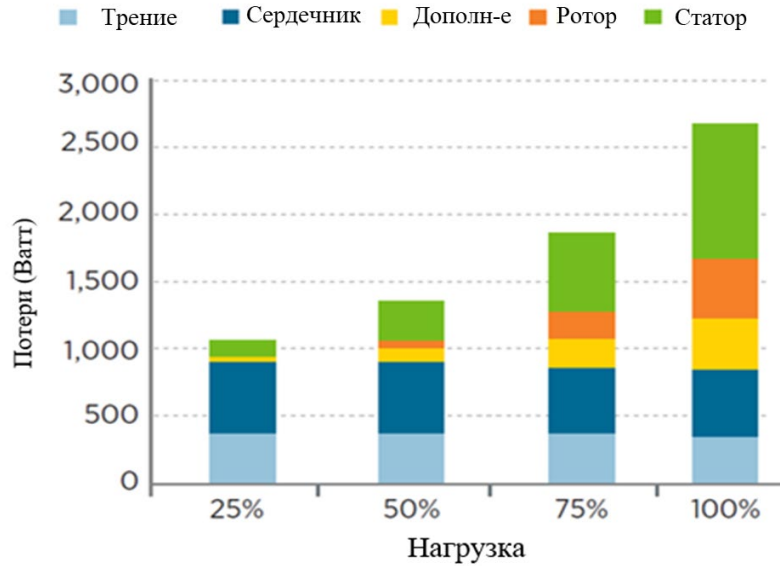


Рисунок 2.1.3 – Изменение распределения потерь в АДКЗ при различной величине нагрузки

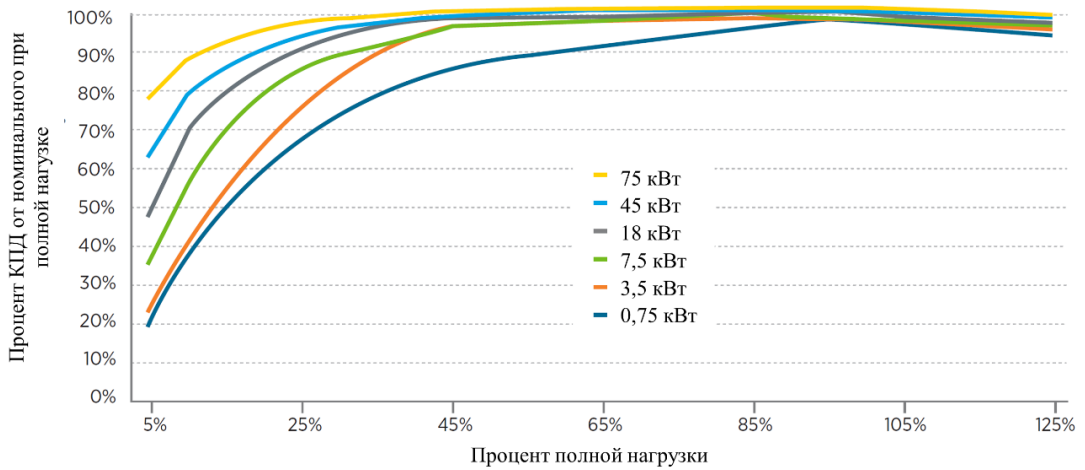


Рисунок 2.1.4 – Изменение КПД АД при различной нагрузке и паспортной мощности

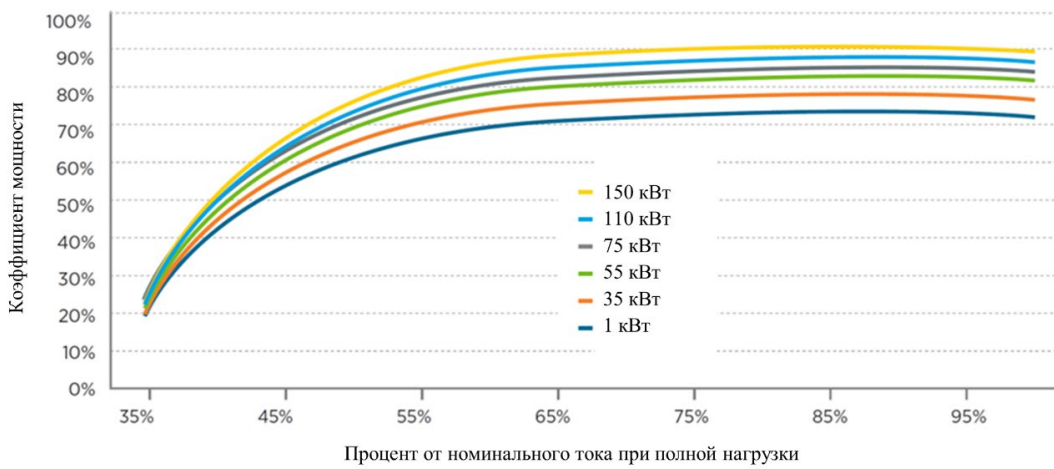


Рисунок 2.1.5 – Изменение коэффициента мощности АД при различной нагрузке и паспортной мощности

Более быстрое достижение своих максимальных энергетических характеристик КПД и $\cos\varphi$ для двигателей большей мощности должно учитываться при определении отклонения от номинальных значений с учетом нагрузки. Несмотря на влияние величины нагрузки на энергетические характеристики, выявление отклонения от номинальных характеристик возможно без привязки текущему уровню нагрузки в диапазоне от 65-100%.

2.2 Анализ влияния качества электрической энергии на АД

Работа ЭМО в сочетании с нарушениями качества электроэнергии в электрической сети приводит к неизбежным потерям в оборудовании, что обычно проявляется в повышении температуры и снижении энергетической эффективности по причине увеличения потерь и снижении КПД. Значительное влияние оказывает отклонение напряжения на производительность АД (Рисунок 2.2.1), согласно статистике, длительное отклонение напряжения является причиной 2% отказов.

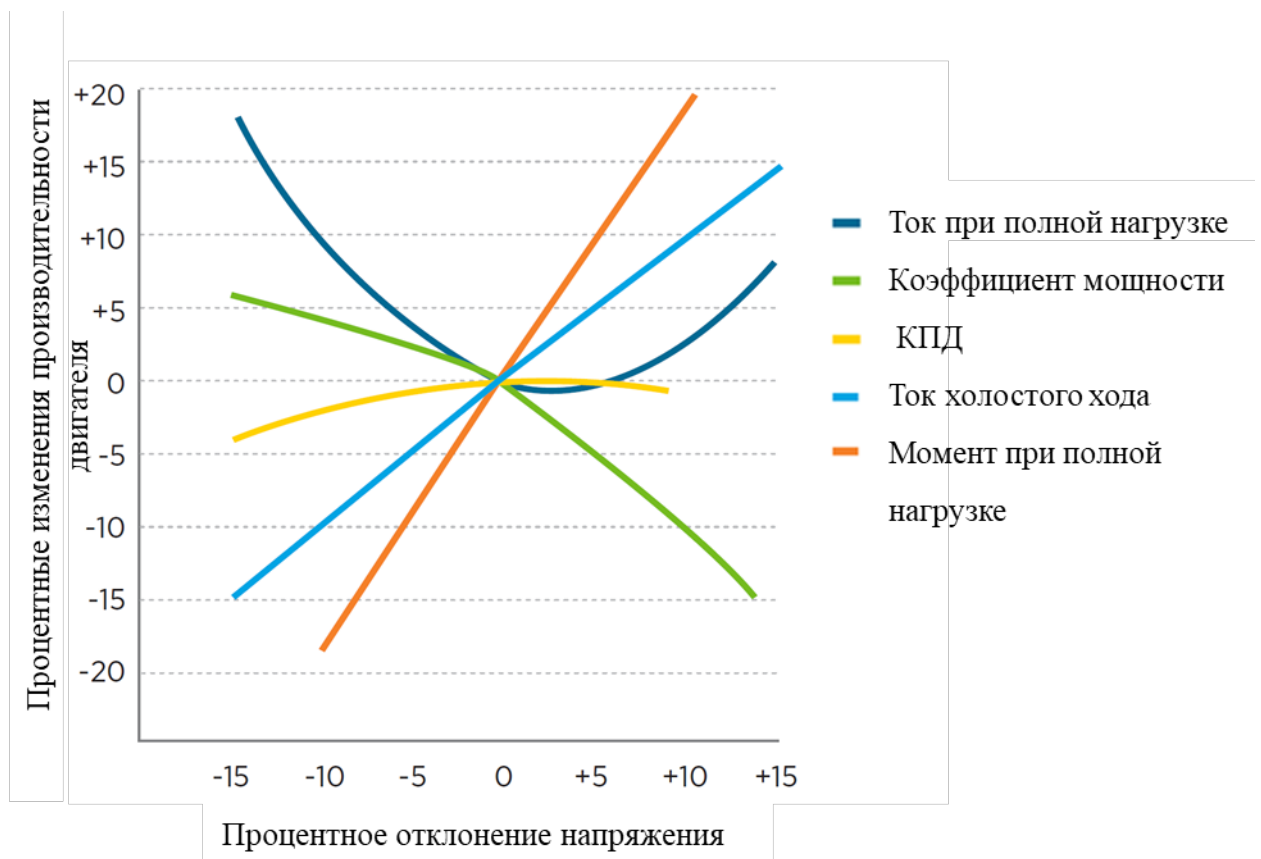


Рисунок 2.2.1 – Влияние отклонения напряжения на производительность

Уровень отклонения напряжения от номинального является одним из факторов, который необходимо учитывать при анализе энергетических параметров с целью диагностики ЭМО.

Особое внимание в исследованиях уделяется снижению энергетических характеристик АДКЗР при несимметричном напряжении питания. Так согласно зависимости потерь электроэнергии в АД от величины небаланса напряжения (Рисунок 2.2.2) уже при 2% рост потерь достигает 10%, а при небалансе 6% потери возрастают до 50%.

При оценке наличия дефектов небаланс напряжения и обусловленный им рост потерь может внести существенные искажения в результаты. Поэтому необходимо учитывать наличие небаланса при анализе электрических параметров.

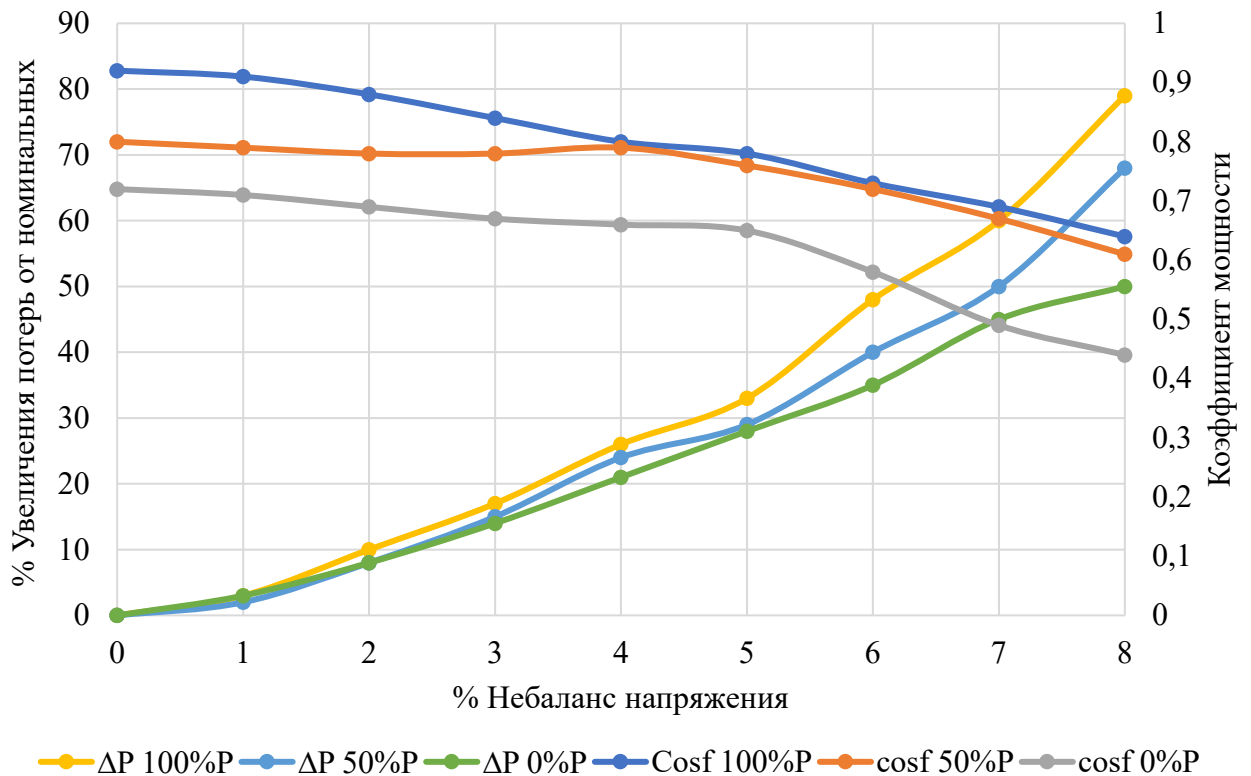


Рисунок 2.2.2 – Изменение потерь электроэнергии в АД от уровня небаланса напряжения

О влиянии гармоник напряжения и несимметрии напряжения на асинхронные двигатели написано большое количество литературы, охватывающей ожидаемый срок службы [36, 175, 280, 295]. Высшие гармонические составляющие (ВГС) тока и напряжения оказывают негативное мгновенное и длительное воздействие на ЭМО, которое определяются типом, мощностью и режимом работы

нелинейной нагрузки (НН), а также влиянием со стороны сети электроснабжения [1, 36, 195, 203].

Длительные воздействия способствуют повышению температуры обмоток ЭМО [36, 49, 185], а рост дополнительных потерь электроэнергии обусловлен уровнем и порядком ВГС [55, 64] и определяется интегральными коэффициентами (2.2.1), согласно [175].

$$k_1 = \sum_{n=2}^{\infty} U_n^2 \frac{\sqrt{n} + \sqrt{n+1}}{n^2}; k_2 = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{U_n^2}{n\sqrt{n}}; k_3 = \sum_{n=2}^{\infty} \sqrt{n} I_n^2; k_4 = \sum_{n=2}^{\infty} n U_n^2. \quad (2.2.1)$$

Мгновенными воздействиями ВГС тока и напряжения являются шум и вибрация работе ЭМО [3, 8, 143, 195, 203], что связано с подробно раскрытым в научных трудах понятием «электромеханическая совместимость электрооборудования» [36, 143, 165].

В ряде исследований установлены закономерности изменения кратности снижения срока службы γ в зависимости от суммарного коэффициента гармоник напряжения k_U [55, 64] для ЭМО в сетях ГиНГП [12], показывающие снижение срок службы ЭМО относительно паспортного при увеличении ВГС.

Воздействие на ЭМО в узлах нагрузки определяют параметры несинусоидальных режимов, присутствующих в электрических сетях при изменении режимов энергообеспечения в аварийных ситуациях, а также связанное с этим количество и тип подключенной нагрузки [2, 7, 290]. Поэтому на передний план выходит комплексный анализ условий работы ЭМО при анализе электрических параметров с целью диагностики.

Общий рост потребляемого тока ЭМО, обусловленный наличием ВГС имеет нелинейный характер. Однако с учетом анализа, проведенного в первой главе необходимо отметить слабую зависимость роста третьей гармоники нулевой последовательности при увеличении искажения тока, как отмечалось ранее, третья гармоника и её производные являются чувствительными к ряду повреждений.

Вторая гармоника напряжения оказывается наиболее критической из отдельных гармоник, что приводит к наибольшему увеличению линейного тока, а

комбинация всех гармоник приводит к нелинейному увеличению общего потребляемого тока (Рисунок 2.2.3).

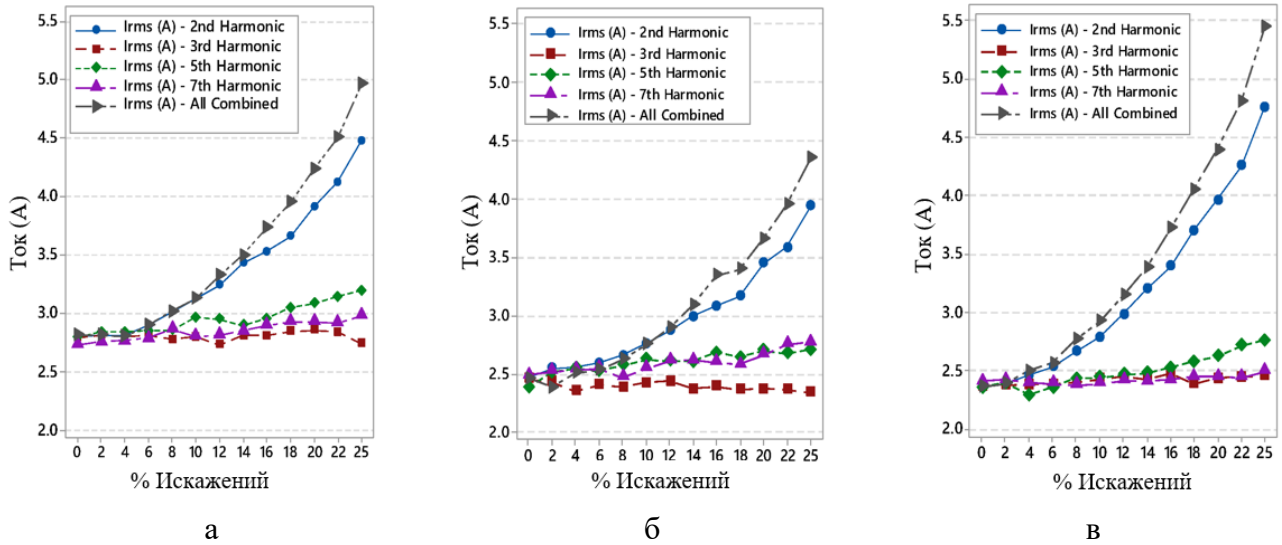


Рисунок 2.2.3 – Увеличение тока для 2-й, 3-й, 5-й, 7-й и всех гармоник комбинированного порядка для электрических двигателей: а – IE2 АДКР; б – IE3 IE3; с – IE4 СМПМ

Для синхронной машины с постоянными магнитами ток увеличивается на 100% и в два раза превышает исходное значение при отсутствии искажений и той же нагрузке. Пятая гармоника обратной последовательности увеличивается больше по сравнению с седьмой гармоникой прямой последовательности во всех рассмотренных случаях (Рисунок 2.2.4).

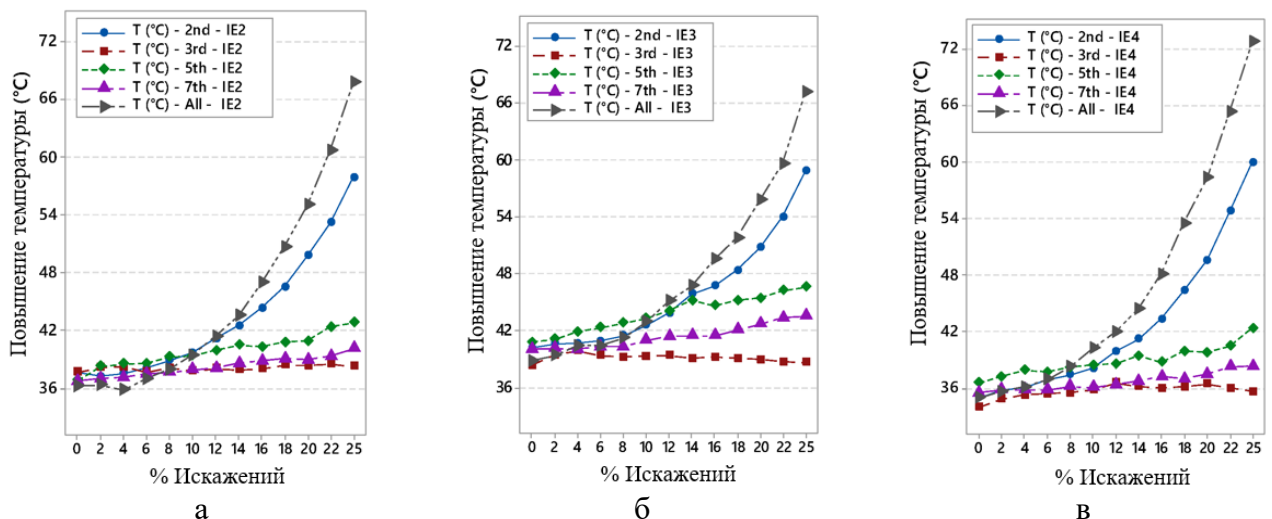


Рисунок 2.2.4 – Повышение температуры при наличии гармоник напряжения 2-й, 3-й, 5-й, 7-й и всех гармоник в совокупности для электрических машин: а – IE2 АДКР; б – IE3 IE3; с – IE4 СМПМ

Наличие ВГС приводит к увеличению нагрева электрических машин, что соответствует характеристикам увеличения потребляемого тока. При отсутствии

увеличения нагрузки и росте вклада ВГС напряжения питающей сети температура увеличивается от 1,8 до 2 раз в зависимости от типа машины и класса её энергетической эффективности, наибольший вклад в рост температуры вносит вторая гармоника. Третья гармоника не приводит к значительному повышению температуры, а пятая и седьмая гармоники приводят к одинаковому увеличению для трех двигателей.

На (Рисунок 2.2.5) приведены зависимости наработки на отказ $t_{отк}$ ЭМО в условиях нефтегазодобывающих предприятий от коэффициента k_U (а) и степени уменьшения паспортного срока службы электроустановок γ от k_U [5, 9, 140, 141]. Обобщение зависимости (Рисунок 2.2.5) и аппроксимирование результатов обработки диагностических данных необходимо рассматривать как взаимодополняющий анализ электрических параметров при диагностике и прогнозировании сокращения срока службы и наработки на отказ. Время отказа $t_{отк}$ изменялось в пределах от 20 до 400 дней при значениях k_U от 2,5 до 8,4 %. Зависимости (Рисунок 2.2.5) получены по справочным данным об эксплуатационных параметрах ЭМО и на основе экспериментальных данных [66, 75, 270].

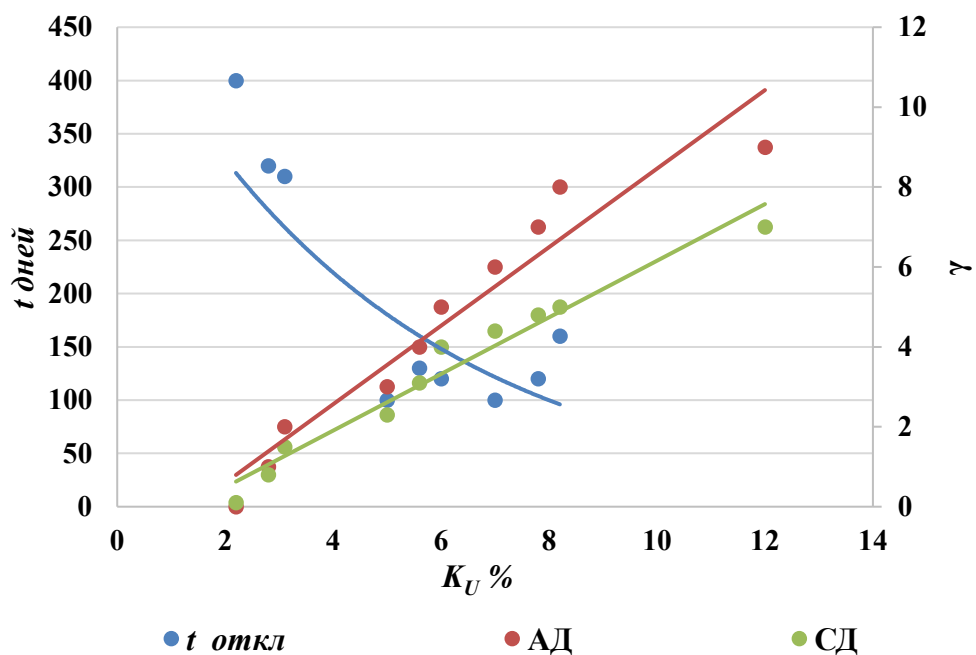


Рисунок 2.2.5 – Зависимости наработки на отказ ЭМО, кратности снижения срока службы γ АДКР и СД от коэффициента k_U

По представленным зависимостям оценивается влияние степени k_U на результаты диагностики и оценки остаточного ресурса при прогнозировании продолжительности срока службы изоляции ЭМО.

2.3 Влияние повреждений и качества электроэнергии на безопасность эксплуатации электромеханического оборудования

У АДКЗР с поврежденными стержнями ротора ухудшаются пусковые характеристики. Основными параметрами, характеризующими пусковые характеристики, являются пусковой момент и время пуска. При пуске АДКЗР пусковой момент должен быть больше момента нагрузки, а время пуска является косвенным отражением пускового момента. Чем меньше пусковой момент, тем больше требуется времени для пуска. Однако АДКЗР может запуститься при определенных условиях при наличии обрыва стержней ротора (ОСР), при этом его эксплуатационные характеристики ухудшатся.

Эквивалентные схемы (Рисунок 2.3.1) с нормальными стержнями ротора и поврежденным стержнем №16, причем аналогичная ситуация наблюдается и при обрыве нескольких стержней.

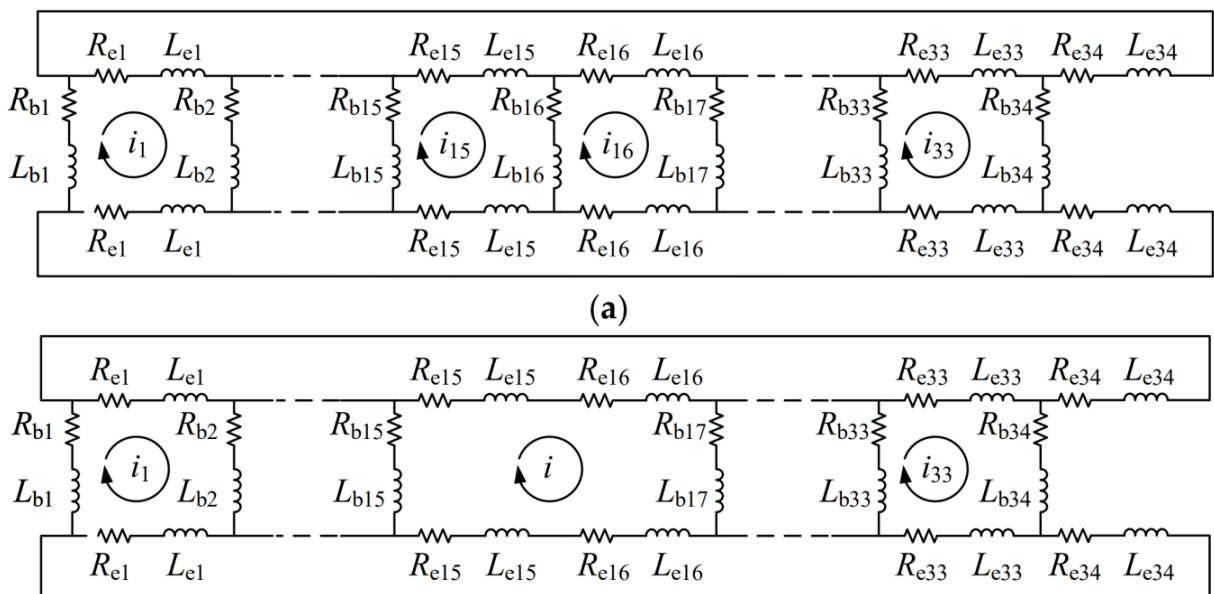


Рисунок 2.3.1 – Модель схемы с неисправностью БРБ: а – нормальный ротор; б – оборванный стержень №16; R_e и L_e – сопротивление и индуктивность концевой кольца, R_b и L_b – сопротивление и индуктивность проводника, а i – ток контура ротора

Становится очевидным, что ОСР вызывает асимметрию в цепи ротора, при этом изменяется и структура тока в клетке ротора. Кроме того, магнитное поле, создаваемое током, также становится несимметричным.

В расчетной модели на вал АДКЗР прикладывается постоянный номинальный момент нагрузки и реализуется один, два и три оборванных стержня соответственно. После чего проводится конечно-элементное моделирование процесса пуска.

Результаты моделирования показывают, что ОСР не оказывает серьезного влияния на процесс пуска АДКЗР при одном оборванном стержне. Время пуска почти полностью совпадает с временем пуска в режиме без повреждения. Время пуска увеличивается на 5% в случае двух оборванных стержней и на 10% при трех оборванных стержнях (Рисунок 2.3.2, Рисунок 2.3.3).

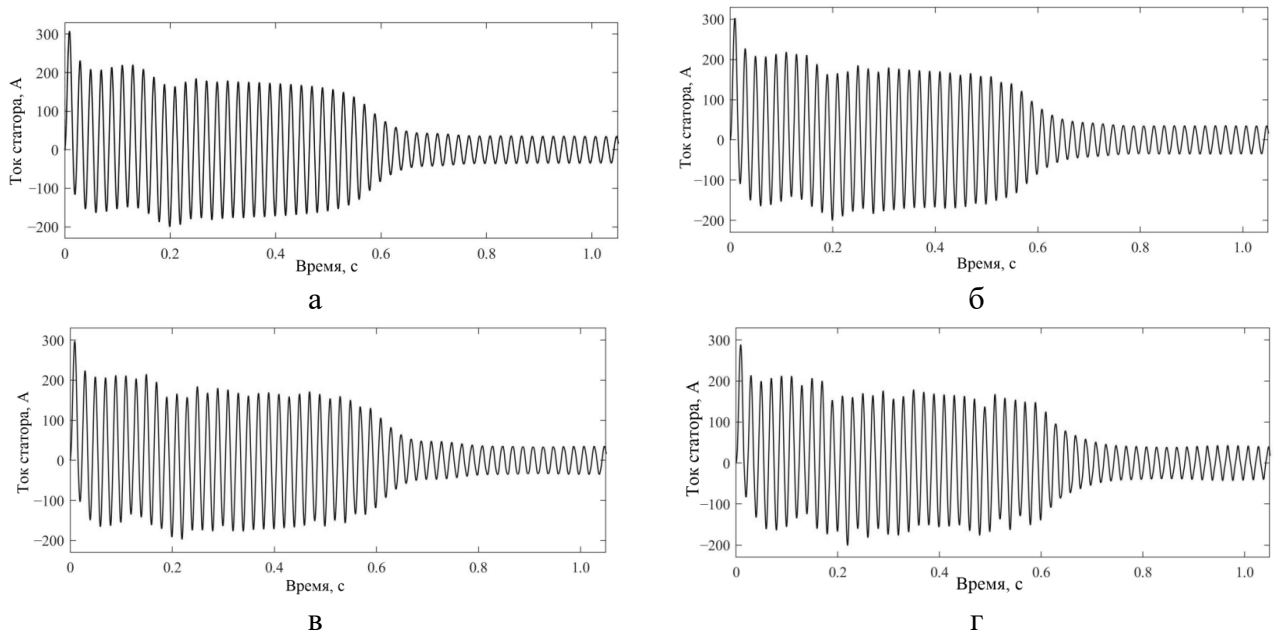


Рисунок 2.3.2 – Осциллограммы тока при различных уровнях повреждения: а – нормальный; б – один оборванный стержень; в – два оборванных стержня; г – три оборванных стержня

Пуск двигателя является кратковременным процессом общей продолжительностью всего около 0,7 с, и увеличение времени, вызванное обрывом стержня, незначительно по сравнению с длительным процессом установившегося режима работы. По окончании процесса запуска скорость вращения двигателя стабильная, без колебаний. При этом выходная механическая мощность двигателя в установившемся режиме не претерпевает явных изменений. Таким образом, при

данных условиях АДКЗР технически удовлетворяет всем требованиям непрерывной безопасной работы, однако существующие повреждения увеличивают риск внезапного останова машины.

Ток оборванного стержня становится равным нулю, в то время как амплитуда тока стержней, прилегающих к сломанному стержню, возрастает. В то же время амплитуда тока в стержнях, расположенных дальше от поврежденного стержня, увеличивается незначительно. Это явление указывает на то, что ротор компенсирует асимметрию магнитного поля, вызванную поврежденными стержнями, увеличивая ток стержня вблизи места повреждения. При ОСР амплитуда тока каждого стержня всего короткозамкнутого ротора имеет незначительные колебания распределения в пространстве. Чем больше повреждений в роторе, тем сильнее проявляется это явление.

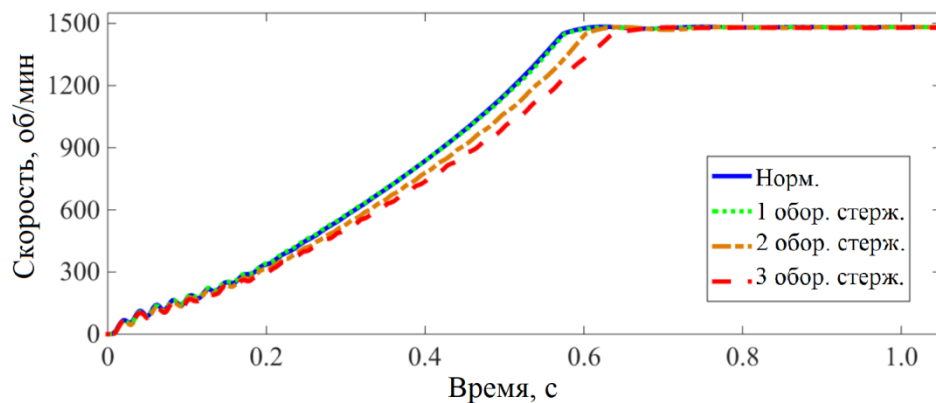


Рисунок 2.3.3 – Частота вращения при различных уровнях повреждения.

Проведенное моделирование доказывает, что по времени пуска, амплитуде пускового тока возможно контролировать наличие повреждений.

Оценка влияния несимметрии питающего напряжения на устойчивость синхронных двигателей (СД) серии СТД (Рисунок 2.3.4) [65, 68] и границы устойчивости СД типа СТД-6300 [64] показывают (Рисунок 2.3.4 а), что величина коэффициента несимметрии не оказывает влияния на устойчивость СД, а зависит только от значения напряжения прямой последовательности [64].

На (Рисунок 2.3.5 б) приведены зависимости изменения критического прерывания питания при вариации инерционной постоянной времени T_j , в случае полуторакратной форсировке напряжения возбуждения.

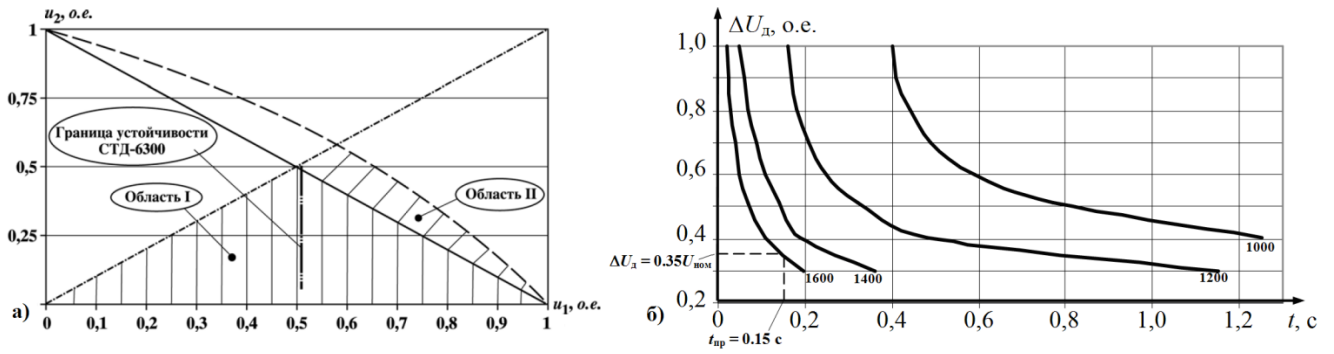


Рисунок 2.3.4 – а) Области и границы напряжения обратной последовательности при вариации фазового угла ψ СТД-6300; б) Изменение предельного уровня потерь напряжения ЭМО от времени при восстановлении напряжения до 80% при вариации длины подвеса ПЭД L

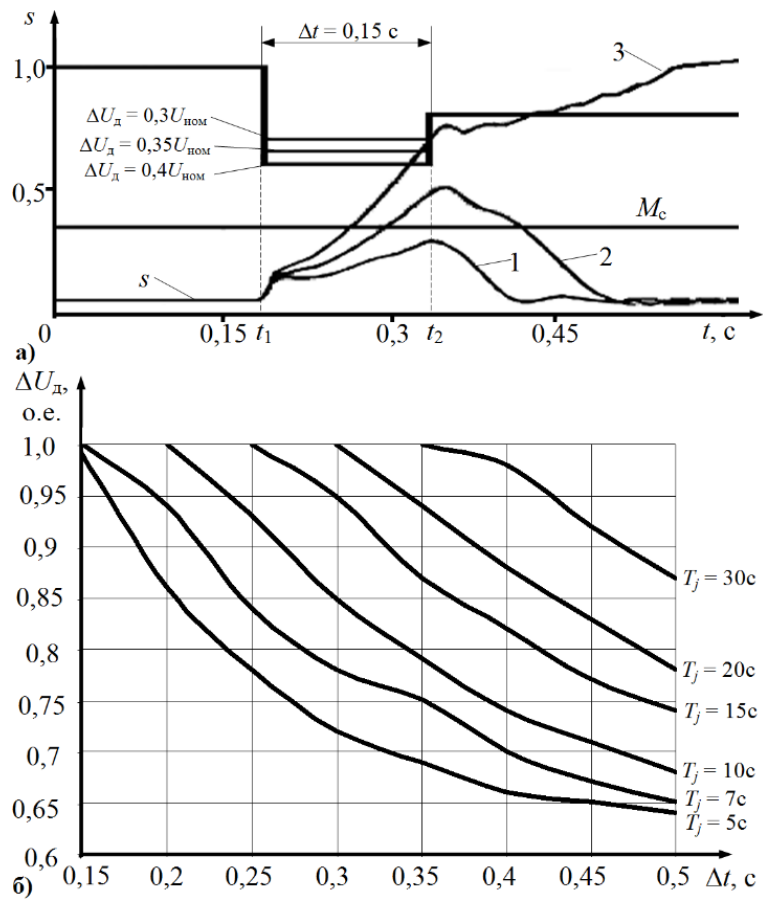


Рисунок 2.3.5 – а) Изменение скольжения АДКР от предельного уровня потери напряжения $\Delta U_{д}$; б) Зависимость предельного уровня потерь питания от времени КЗ при вариации $T_j, k_{н} = 1$

Из (Рисунок 2.3.5 б) следует, что при снижении момента инерции механизма и увеличении коэффициента загрузки СД снижается граница статической устойчивости последнего, справедливо и ухудшение эксплуатационных характеристик по причине наличия повреждения, что снижает границу устойчивости СД и создает риски аварийных ситуаций при менее длительных провалах напряжения относительно расчетных.

2.4 Влияние повреждений на энергетические характеристики электромеханического оборудования

Износ подшипника сопровождается выкрашиванием поверхностей беговых дорожек и шариков. В результате перекачивание шариков сопровождается многочисленными, на первый взгляд, хаотическими ударами, что приводит к появлению вибрации в широком диапазоне частот (200-1000 Гц). Вибрация радиальная, нестабильная, временами может исчезать, что зависит от нагрузки. При значительном разрушении подшипника вибрации снижаются, а вал при этом удерживается сальником, который выполняет функцию подшипника скольжения, что сопровождается перегревом сальникового узла.

В исследовании [182] проводились измерения потребления электроэнергии и производительности насосной системы до замены и после замены поврежденных подшипников (Таблица 2.4.1).

Таблица 2.4.1 – Потребление электроэнергии до и после замены

Расход (м ³ /с)	Напор (м)	Мощность (кВт)	Потребляемая электрическая мощность (кВт)		
			До замены	После замены	Снижение %
12.38	2,31	280,54	425,06	382,55	10
14,4	2.16	305.13	476,76	424,31	11
15.1	2.11	312,55	487,59	425,83	12
16	2	313	496,82	427,27	14
17.2	1,94	327,34	507,5	435,13	14
18.21	1,87	334,5	515,4	448,39	13
19.35	1,68	335,38	526,49	464,34	11
20.13	1,51	342,6	542,94	477,94	12

В свою очередь повреждение стержней ротора не оказывает одинакового влияния на различные виды потерь в АДКЗР. Эта неисправность приводит к увеличению потерь в сердечнике, что является следствием локального насыщения. Асимметричное магнитное поле в области поврежденного стержня ротора (вокруг

стержня с большим током) приводит к магнитному насыщению. Это насыщение не охватывает всю часть АД и возникает в отдельных областях ротора, сердечников статора и воздушного зазора. Это явление оказывает влияние на расположение горячей точки внутри сердечника и увеличивает потери в сердечнике. При этом увеличиваются потери на сопротивлении статора из-за увеличения гармоник в токе статора. Ток разрушенного стержня проходит через соседние стержни, что само по себе вызывает повышение и понижение тока некоторых стержней и, в конечном счете, несколько снижает потери на сопротивлении стержней ротора. В результате обрыва стержней увеличивается ток торцевого кольца, что приводит к увеличению потерь торцевого кольца. Падение потерь в стержнях ротора превышает рост потерь торцевого кольца, в результате чего суммарные потери в роторе снижаются.

В обмотке статора индуцируются малые гармонические магнитные поля с частотами $(1 \pm 2ks)f_1$ (где s – скольжение, f_1 – частота источника питания, k – целое положительное число) и $[\lambda(1-s)/p \pm s]f_1$ (где p – число пар полюсов двигателя, $\lambda = 1, 3, 5, \dots, 2k-1$). Из-за влияния насыщения и других факторов даже при питании короткозамкнутого АД синусоидальным напряжением ток статора все равно содержит нечетные гармоники, особенно 5-ю и 7-ю. При соединении обмотки статора в треугольник, внутри них также будет циркулировать ток 3-й гармоники.

Потери в меди статора рассчитываются как (2.4.1).

$$p_{scu} = \frac{1}{nT} \int_0^{nT} R_p (i_A^2 + i_B^2 + i_C^2) dt, \quad (2.4.1)$$

где T – период тока статора;

n – число периодов тока статора;

R_p – сопротивление фазы статора;

i_A, i_B, i_C – осциллограммы тока фаз А, В и С во временной области соответственно.

Суммарные потери в стержнях ротора могут быть получены путем сложения потерь в каждом стержне (2.4.2).

$$p_{rcu1} = \sum_i \frac{1}{\sigma} L_b S_i J_i^2, \quad (2.4.2)$$

где σ – проводимость прутка;

L_b – эффективная длина прутка;

S_i – площадь i -й единицы прутка;

J – среднеквадратичное значение плотности тока.

Суммарные потери в торцевом кольце ротора рассчитываются как (2.4.3).

$$p_{rCu2} = \sum_i^{2Z_2} I_{ej}^2 \cdot R_{ej}, \quad (2.4.3)$$

где Z_2 – число стержней ротора;

I_{ej} – среднеквадратичное значение тока j -го концевого кольца;

R_{ej} – сопротивление j -го концевого кольца.

В соответствии с уравнениями (2.4.2) и (2.4.3) можно рассчитать потери в стержнях и торцевых кольцах ротора, соответственно, и получить общие потери в обмотке ротора.

Суммарные потери в сердечнике равны сумме потерь в сердечнике, создаваемых гармониками магнитной индукции двух переменных магнитных полей. Конкретные расчетные формулы выглядят следующим образом (2.4.4) – (2.4.8).

$$p_{hk} = k_h \sum_k f_k (B_{k\max}^2 + B_{k\min}^2), \quad (2.4.4)$$

$$p_{ck} = k_c \sum_k f_k^2 (B_{k\max}^2 + B_{k\min}^2), \quad (2.4.5)$$

$$p_{ek} = k_e \sum_k f_k^{1,5} (B_{k\max}^{1,5} + B_{k\min}^{1,5}), \quad (2.4.6)$$

$$p_{Fek} = p_{hk} + p_{ck} + p_{ek}, \quad (2.4.7)$$

$$p_{Fe} = l_{Fe} \sum_k p_{Fek} \cdot S_k, \quad (2.4.8)$$

где p_{Fek} , p_{hk} , p_{ck} и p_{ek} – потери в сердечнике, гистерезисные потери, классические потери и избыточные потери на единицу объема k -го прибора соответственно;

k_h , k_c и k_e – коэффициенты гистерезисных потерь, классических потерь и избыточных потерь соответственно;

f_k – частота магнитной индукции;

$B_{k\max}$ и $B_{k\min}$ – амплитуды индукции потока по длинной и короткой оси регулярного эллиптического вращающегося магнитного поля соответственно;

l_{Fe} – эффективная длина железного сердечника;

S_k – площадь k -го блока сердечника.

Механические потери в основном включают в себя потери на трение в подшипниках и вентиляцию. Для обычных, малых и средних АД с короткозамкнутым ротором механические потери обычно рассчитываются по следующей формуле (2.4.9).

$$p_m = \left(\frac{3}{p}\right)^2 D_1^4 \times 10^4, \quad (2.4.9)$$

где D_1 – внешний диаметр статора.

Дополнительные потери обусловлены такими факторами, как импульсные колебания магнитного потока в воздушном зазоре из-за пазов статора и ротора, а также гармониками магнитодвижущей силы статора и ротора. Эти потери обычно рассчитываются по эмпирической формуле (2.4.10), приведенной в [104].

$$p_{ad} = (0.025 - 0.005 \log P_2) P_1, \quad (2.4.10)$$

где P_2 – механическая мощность;

P_1 – электрическая мощность.

Суммарные потери в короткозамкнутом АД можно выразить как (2.4.11).

$$\sum p = p_{scu} + p_{rcu} + p_{Fe} + p_m + p_{ad}. \quad (2.4.11)$$

Коэффициент полезного действия асинхронного двигателя выражается как (2.4.12).

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum p} = 1 - \frac{\sum p}{P_1}. \quad (2.4.12)$$

На (Рисунок 2.4.1) представлено влияние повреждения стержней ротора на потери в сердечнике, омические потери в статоре, омические потери в роторе и общие потери АДКЗР при различном количестве сломанных стержней (КСС). Из расчета следует, что потери в сердечнике и потери в обмотке статора увеличиваются, а потери на сопротивлении ротора уменьшаются при увеличении КСС. При увеличении КСС суммарные (Рисунок 2.4.1) потери АДКЗР возрастают. Это свидетельствует о том, что рост потерь в сердечнике и омических потерь больше, чем снижение омических потерь в роторе. Экспериментальные результаты, приведенные в ряде источников близки к результатам моделирования, что подтверждает правильность модели АДКЗР.

Под влиянием реактивного сопротивления статора и реактивного сопротивления утечки наведенный потенциал будет давать значительную погрешность по сравнению с номинальным напряжением. Для точного измерения базовых потерь в сердечнике при номинальной нагрузке строится кривая в соответствии с наведенным потенциалом $E = U_0$ (2.4.13) – (2.4.14).

$$E = \sqrt{(U_N - I_p R_p \cos \varphi)^2 + (I_p R_p \sin \varphi)^2}, \quad (2.4.13)$$

где U_N и I_p – линейное напряжение и фазный ток статора при номинальной нагрузке и напряжении соответственно.

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{3 \cdot U_N \cdot I_p}. \quad (2.4.14)$$

Электромагнитная мощность P_M передается статором ротору по закону электромагнитной индукции. Здесь составляющая $s \cdot P_M$ становится потерями в обмотке ротора, а оставшаяся $(1 - s)P_M$ преобразуется в механическую мощность. Поэтому потери в меди ротора p_{rCu} можно представить в виде (2.4.15).

$$p_{rCu} = (P_1 - p_{sCu} - p_{Fe}) \cdot s. \quad (2.4.15)$$

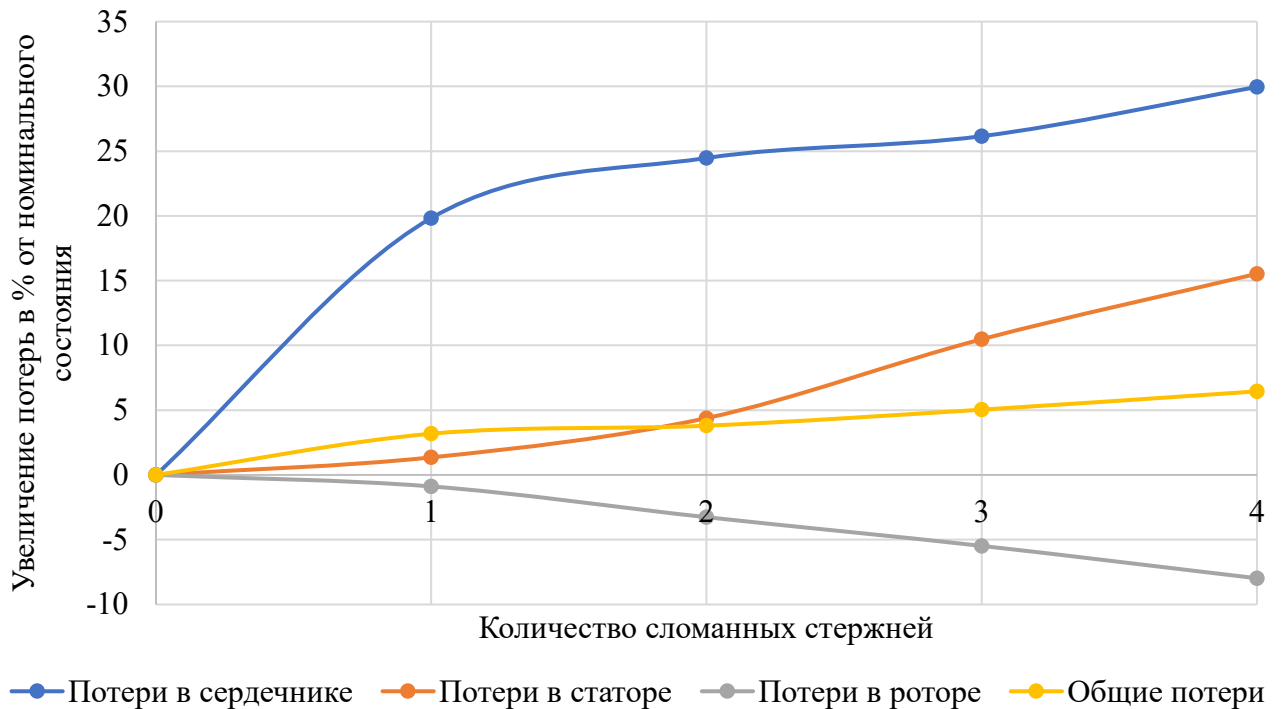


Рисунок 2.4.1 – Влияние повреждения стержней ротора на потери в АДКЗР

Таким образом, потери в обмотке статора можно получить, подставив в уравнение (2.4.1) экспериментальный трехфазный ток статора в установившемся

режиме, а потери в сердечнике при номинальной нагрузке определяются с помощью уравнения (2.4.13) по характеристической кривой потерь в сердечнике в режиме холостого хода (Рисунок 2.4.1). Через уравнение (2.4.14) можно получить потери в обмотке ротора, а из уравнения (2.4.12) рассчитать КПД двигателя. Результаты расчетов потерь и КПД в нормальных условиях и при различных степенях неисправности с ОСР сравниваются в таблице 2.4.2.

При неисправности с ОСР (Таблица 2.4.2) увеличиваются потери в обмотке статора и сердечнике. Хотя потери в обмотке ротора уменьшаются, общий коэффициент полезного действия двигателя также снижается. По сравнению с нормальным режимом работы, при наличии только одного поврежденного стержня указанные потери и КПД изменяются на 2,59 %, 20,86 %, 10,04 % и 0,63 % соответственно. Очевидно, что как увеличение потерь, так и снижение КПД, вызванные ОСР, несмотря на то что они отрицательно сказываются энергетической эффективности, в рассмотренных случаях не приводят к остановке оборудования, что обуславливает длительное существование потерь. Рассмотренная математическая модель сравнивалась с результатами экспериментов (Таблица 2.4.2), расхождение составило менее 10%, что говорит о хорошей сходимости модели и эксперимента.

Таблица 2.4.2 – Потери и КПД при разном количестве ОСР для АДКЗР 7,5 кВт

Параметр	Нормальное состояние	Один поврежденный стержень	Два поврежденных стержня
Полные потери, Вт	1209,85	1273,25	1348,38
КПД, %	86,12	85,49	84,75

2.5 Влияние потерь на срок службы

В течение всего этапа эксплуатации на ЭМО влияют термические, электрические и механические нагрузки, а также условия окружающей среды. Согласно статистике, представленной в первой главе, тепловые нагрузки преобладают над другими, поскольку процесс старения изоляции полностью зависит от значения рабочей температуры и времени работы. Поэтому в качестве индикатора для оценки состояния изоляции и прогнозирования срока службы ЭМО

можно использовать максимальную температуру нагрева ЭМО. Основной вклад в изменение температуры вносят потери электроэнергии, в том числе потери в меди, потери в сердечнике, при этом потери в меди составляют наибольший процент от общих потерь мощности.

Математическое описание влияния всех факторов на срок службы изоляции двигателя не существует по причине сложности, зачастую модели упрощаются и в них могут не учитываться ряд факторов, например, скачки напряжения, вызванные коммутацией или повторяющимися импульсами, тепловое старение изоляции из-за различий в конструкции двигателя и условий эксплуатации, а также повреждение изоляции, вызванное дополнительными механическими вибрационными воздействиями. При этом потери мощности асинхронного двигателя рассматриваются как основной фактор, приводящий к повышению максимальной температуры ЭМО, что впоследствии вызывает старение изоляции.

Существует ряд подходов, определяющих изменение режимов работы в зависимости от воздействующих факторов, например, согласно стандарту *IEEE 519*, при содержании гармоник напряжения в АД более 5% необходимо применять ограничение загрузки машины [89]. В работе [222] рассмотрено увеличение нагрузочной способности трехфазного АДКЗР с несимметричным питанием в случаях повышенного и пониженного напряжения. При одинаковых условиях машина с более низким уровнем насыщения имеет меньший коэффициент снижения мощности по сравнению с машиной с более высоким уровнем насыщения. Моделей, учитывающих увеличение потерь по причине внутренних неисправностей в качестве оценки влияния, исследуются достаточно мало и в основном используют упрощенные тепловые модели. Однако существующие как математические, так и экспериментальные модели подтверждают связь электрических параметров с температурой нагрева.

Основная зависимость между сроком службы изоляционных материалов и абсолютной температурой выглядит следующим образом (2.5.1).

$$L = B e^{\left(\frac{\varphi}{kT}\right)}, \quad (2.5.1)$$

где L – единица времени срока службы;

B – постоянный коэффициент, определяемый экспериментально;

φ – энергия активации, эВ;

T – абсолютная температура, К;

$k = 0,8617 \cdot 10^{-4}$, эВ/К, постоянная Больцмана.

Срок службы при изменении температуры может быть оценен путем пересчета в эквивалентное время на основе эталонного срока службы и температуры (2.5.2).

$$\ln t_1 - \ln t_2 = \left(\frac{E}{k}\right)\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right), \quad (2.5.2)$$

где t_1 – время старения при абсолютной температуре T_1 , К;

t_2 – время старения при абсолютной температуре T_2 , К.

Например, если срок службы асинхронного двигателя класса изоляции F составляет 20 лет t_1 ($= 20$), работающего при температуре горячей точки 100°C ($T_1 = 100 + 273 = 373\text{K}$), то срок службы асинхронного двигателя (t_2), работающего при температуре 150°C ($T_2 = 150 + 273 = 423\text{K}$), может быть рассчитан как (2.5.3) – (2.5.4).

$$\ln \left(\frac{20}{t_2}\right) = \left(\frac{1,05}{0,8617 \times 10^{-4}}\right)\left(\frac{1}{373} - \frac{1}{423}\right). \quad (2.5.3)$$

$$t_2 = 0,421 \text{ (Y)} \quad (2.5.4)$$

Кроме того, для применения в промышленном оборудовании широко используется опытная модель теплового старения 10°C , согласно которой срок службы изоляции сокращается вдвое при каждом повышении температуры на 10°C , что можно представить в виде (2.5.5).

$$L_x = L_0 \cdot 2^{\left(\frac{T_b - T_x}{\text{HIC}}\right)}, \quad (2.5.5)$$

где T_x – температура горячей точки для класса изоляции;

L_x – расчетный срок службы при температуре T_x ;

T_b – общая допустимая температура для класса изоляции;

L_0 – контрольный срок службы при номинальной нагрузке.

Интервал уменьшения HIC для классов А, В, F, H и H' соответственно 14, 11, 9,3, 8 и 10.

Количество тепла Q , которое выделяется в двигателе за 1 с (2.5.6).

$$Q = \frac{P_2}{\eta} - P_2 = P_2 \cdot \left(\frac{1}{\eta} - 1\right), \quad (2.5.6)$$

где η – КПД двигателя;

P_2 – мощность на валу двигателя.

Таблица 2.5.1 – Номинальные значения класса изоляции

Класс	Максимальная температура, °С	Повышение температуры, °С
A	105	65
B	130	90
F	155	115
H	180	140
H'	220	180

Исходя из известного количества тепла Q выделенного при работе двигателя, можно подсчитать превышение температуры двигателя τ над температурой окружающей среды, т. е. температуру перегрева (2.5.7).

$$\tau = \frac{Q}{A} \cdot \left(1 - e^{-\frac{A}{C}t}\right) + \tau_0 \cdot e^{-\frac{A}{C}t}, \quad (2.5.7)$$

где A – теплоотдача двигателя, Дж/град*с;

e – основание натуральных логарифмов ($e = 2,718$);

C – теплоемкость двигателя, Дж/град;

τ_0 – начальное превышение температуры двигателя при τ .

Используя данные соотношения, можно определить соотношение увеличения потерь, обусловленных наличием дефектов и сокращение срока службы изоляции.

Предельные тепловые характеристики класса изоляции и допустимое повышение температуры при температуре окружающей среды 40°С (Таблица 2.5.1). Изоляционные материалы и системы могут быть классифицированы в зависимости от температуры, отнесенной к предельному сроку службы, который на основании температурных характеристик составляет почти 20 000 часов [216]. Таким образом, 20 000 ч принято считать сроком службы изоляции машины при полном температурном режиме для применения и проектирования в промышленности ($L_0 = 20\ 000$ ч). Например, предположим, что

двигатель с системой изоляции класса F работает при температуре 124°C. Срок службы машины может быть рассчитан по формуле (2.5.8).

$$L_x = 20000 \cdot 2^{\left(\frac{155-124}{9,3}\right)} = 201587 \text{ ч.} \quad (2.5.8)$$

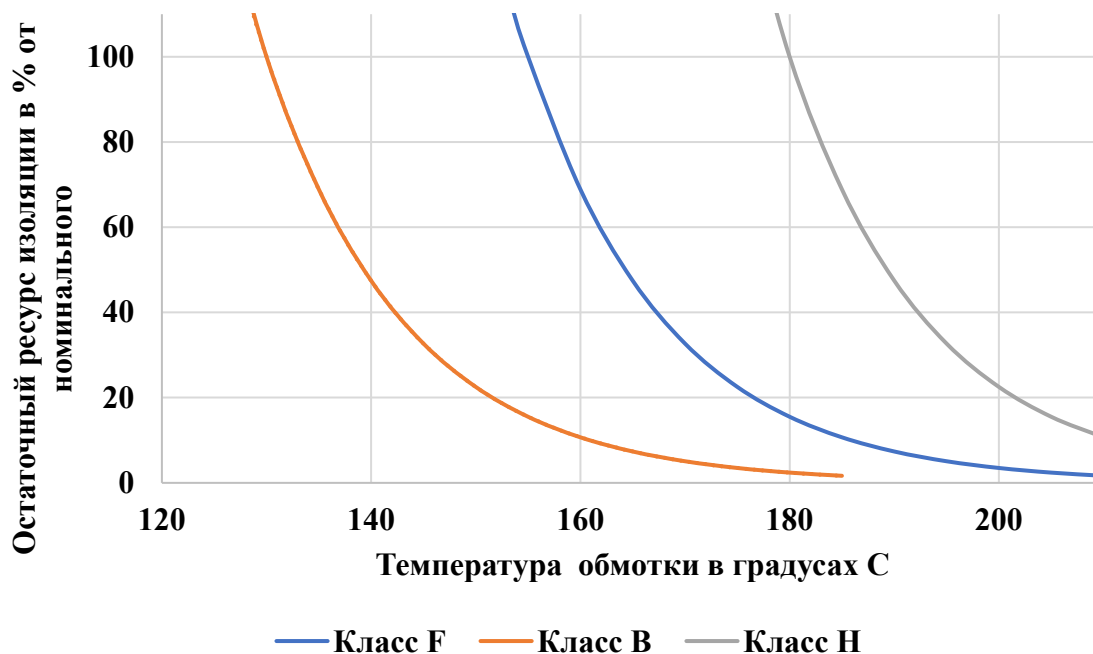


Рисунок 2.5.1 – Снижение срока службы изоляции в зависимости от температуры окружающей среды при номинальной нагрузке и различных классах изоляции

Наличие дефекта приводит к увеличению потерь, повышению температуры и сокращению срока службы машины. При этом повышаются пульсации скорости и крутящего момента, появляются вибрации и шум [178].

На основе проведенных экспериментальных исследований и обобщения результатов работ ученых установлены зависимости влияния ОСР на остаточный ресурс (Рисунок 2.5.2). При полной нагрузке АДКЗР температура обмотки составляет около 150°C, общие потери соответствуют паспортному значению при данной нагрузке, при этом сроке службы 20 000 часов. Повреждение одного стержня и несимметрия, которая при этом возникает, приводит к увеличению тока на 2%, возникают дополнительные потери мощности, обусловленные наличием дефекта на 1,5%, что приводит к увеличению температуры обмотки на 1%, при этом происходит 10%-ая потеря ресурса АДКЗР. При 6 сломанных стержнях ток увеличивается на 12%, при этом не происходит отключения тепловой защиты, дополнительные потери мощности достигают 8% увеличения, при этом

температура обмотки поднимается на 5%, что сокращает срок службы двигателя на 45%. Увеличение потерь до 14% при 10 сломанных стержнях приводят к 80% потери ресурса.

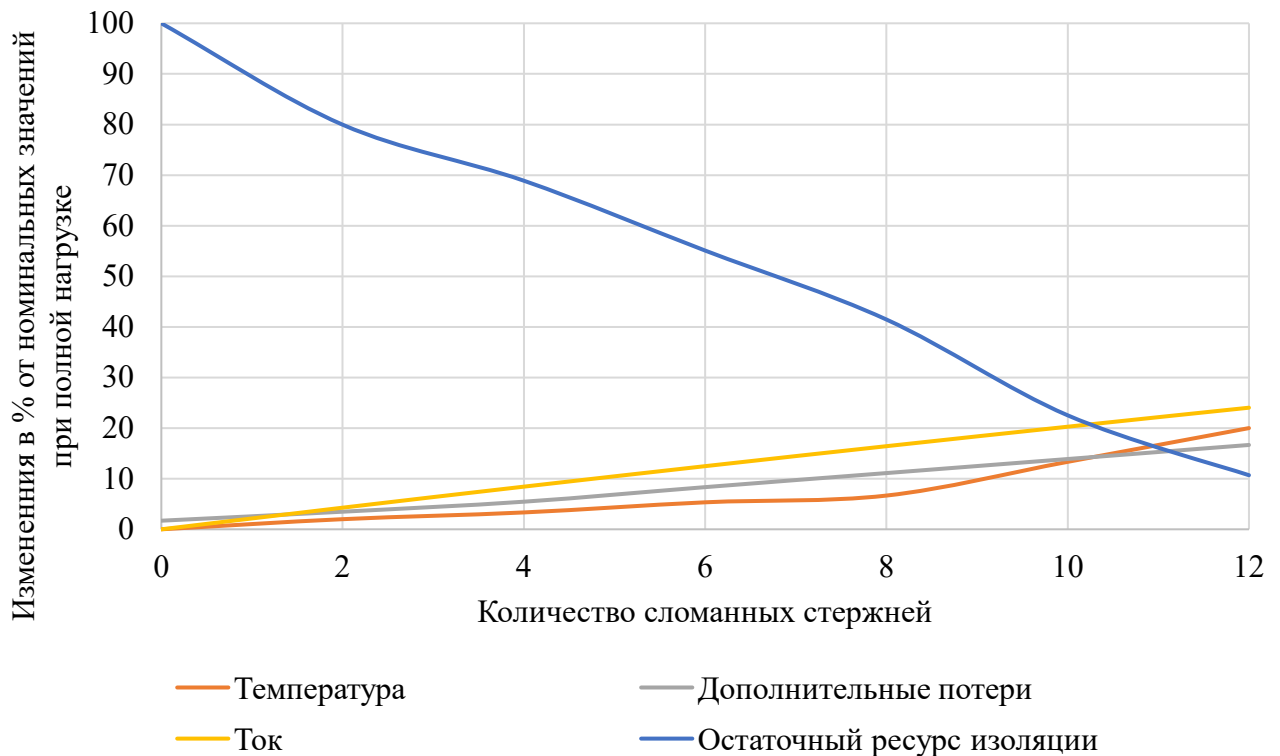


Рисунок 2.5.2 – Снижение срока службы изоляции в зависимости от количества поврежденных стержней, увеличения тока статора и потерь при полной нагрузке АДКЗР

Влияние роста дополнительных потерь, обусловленных наличием повреждения ОСР на сработку остаточного ресурса, изоляции обмотки (Рисунок 2.5.3). Увеличение потерь на сопротивлении статора из-за увеличения гармоник в токе статора и другие негативные явления, связанные с насыщением ротора, приводят к росту дополнительных потерь мощности. Уже при 10% роста дополнительных потерь ресурс изоляции снижается вдвое, при этом учитывая, что тепловая защита от перегрузок допускает длительное превышение мощности на 20-30%, очевидным становится необходимость раннего обнаружения повреждений для исключения дополнительных потерь и снижения влияния на остаточный ресурс изоляции.

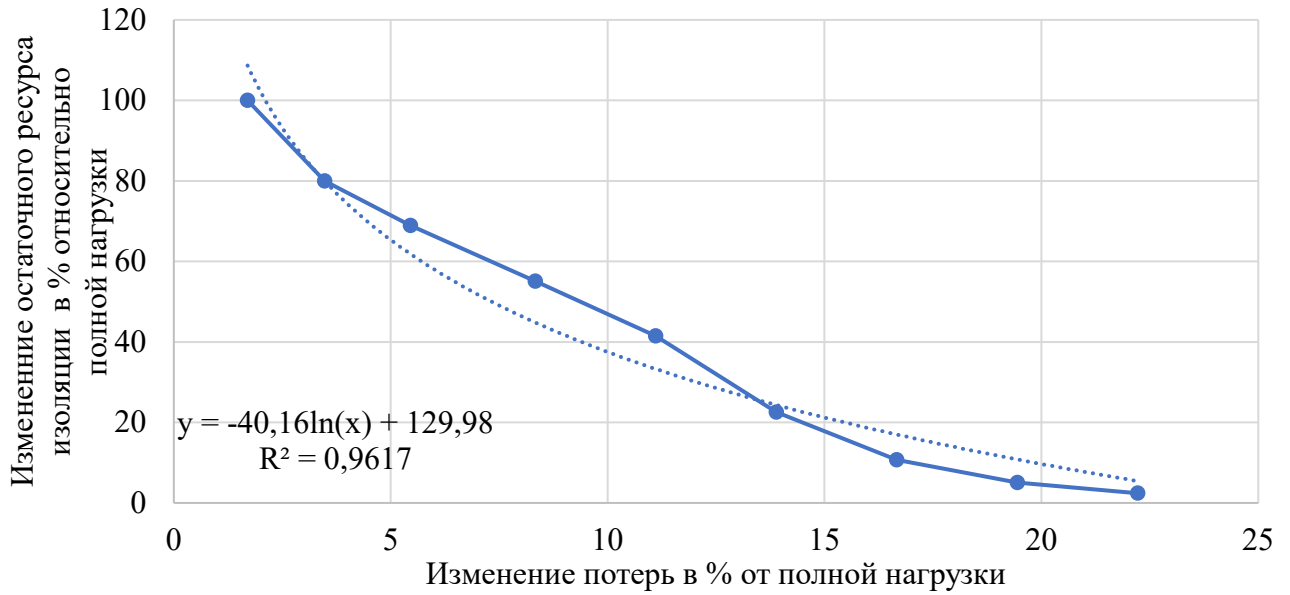


Рисунок 2.5.3 – Снижение срока службы изоляции в зависимости от роста дополнительных потерь обусловленных наличием повреждений

2.6 Анализ показателей качества электрической энергии

Фликер (колебания напряжения) оценивается с помощью кратковременной и долговременной дозы фликера P_{st} и P_{lt} . Колебания напряжения носят случайный характер, поэтому во многих исследованиях, связанных с фликером, принято использовать регулярные колебания напряжения. В данной работе для изучения поведения асинхронного двигателя используется синусоидальная амплитудная модуляция. Такая форма волны может быть определена с помощью (2.6.1) – (2.6.2).

$$u(t) = U_p \sin(2\pi f_c t) * (1 + m \cdot \sin(2\pi f_m t)), \quad (2.6.1)$$

$$m = \frac{\Delta U}{2U_p}, \quad (2.6.2)$$

где U_p – амплитуда основного переменного напряжения;

f_c – основная частота;

f_m – частота модуляции;

ΔU – изменение величины напряжения;

m – глубина модуляции.

В качестве альтернативы (2.6.1) можно выразить как (2.6.3).

$$u(t) = U_p \sin(2\pi f_c t) + \frac{mU_p}{2} \sin\left(2\pi(f_c + f_m)t - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{mU_p}{2} \sin\left(2\pi(f_c - f_m)t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.6.3)$$

Согласно (2.6.3), источник флуктуирующего напряжения содержит две частотные составляющие: сверхсинхронную частоту, называемую верхней боковой полосой (ВБП), и субсинхронную частоту, называемую нижней боковой полосой (НБП). При этом ток статора ВБП- и НБП-компонент практически не потребляется нагрузкой, при этом искажения тока сильно зависят от условий колебаний напряжения (различных изменений величины напряжения и частоты модуляции) и уровня нагрузки, аналогично проблемам с гармониками. При увеличении частоты модуляции и изменении напряжения среднеквадратичный ток статора и ротора двигателя резко возрастает, что увеличивает потери в меди и приводит к повышению температуры обмоток двигателя и, как следствие, ускоряет процесс износа.

Для анализа влияния необходимо контролировать энергетические процессы в ЭМО посредством коэффициентов искажений несимметрии обратной и нулевой последовательности и др. [4] для напряжений, токов и мощностей. При этом для потребителя основную информацию несут осциллограммы токов, поскольку фазное напряжение определяется питающей сетью, а для генераторов токи определяются в наибольшей степени нагрузкой, поэтому необходимо проводить анализ напряжения.

В каждой из фаз гармонический состав напряжений, токов и мощностей характеризует коэффициент гармоник и определяется [11] как (2.6.4).

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}}{U_1} \cdot 100\%, n = 40. \quad (2.6.4)$$

Для i -й гармоники коэффициент гармоники равен (2.6.5).

$$K_{\Gamma i} = \frac{U_{ni}}{U_{1i}} \cdot 100\%. \quad (2.6.5)$$

Отклонение установившегося напряжения (тока, мощности) (2.6.6) – (2.6.7).

$$\delta U_y = \frac{U_y - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100\%. \quad (2.6.6)$$

$$U_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n U_i^2}{n}}. \quad (2.6.7)$$

Коэффициент несимметрии напряжений и аналогично для токов и мощностей (2.6.8) – (2.6.10).

$$K_{2U_i} = \frac{U_{2(1)i}}{U_{1(1)i}}, \quad (2.6.8)$$

где $U_{2(1)i}$ – действующее значение напряжения обратной последовательности, В

$$U_{2(1)i} = \sqrt{\frac{1}{12} \left[\left(\sqrt{3}U_{AB(1)i} - \sqrt{4U_{BC(1)i}^2 - \left(\frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} + U_{AB(1)i} \right)^2} \right)^2 + \left(\frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} \right)^2 \right]}, \quad (2.6.9)$$

где $U_{1(1)i}$ – действующее значение напряжения прямой последовательности, В

$$U_{1(1)i} = \sqrt{\frac{1}{12} \left[\left(\sqrt{3}U_{AB(1)i} + \sqrt{4U_{BC(1)i}^2 - \left(\frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} + U_{AB(1)i} \right)^2} \right)^2 + \left(\frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} \right)^2 \right]}. \quad (2.6.10)$$

Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности (2.6.11) – (2.6.12).

$$K_{0U_i} = \frac{\sqrt{3}U_{0(1)i}}{U_{1(1)i}} 100\%, \quad (2.6.11)$$

$$U_{0(1)i} = \frac{1}{6} \sqrt{\left[\frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} - 3 \frac{U_{B(1)i}^2 - U_{A(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} \right]^2 + \left[\frac{4U_{BC(1)i}^2 - \left(U_{AB(1)i} - \frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} \right)}{3 \sqrt{4U_{B(1)i}^2 - \left(U_{AB(1)i} - \frac{U_{B(1)i}^2 - U_{A(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} \right)}} \right]^2}. \quad (2.6.12)$$

Отклонение частоты определяется по формулам (2.6.13) – (2.6.14).

$$f_y = \frac{\sum_{i=1}^n f_i}{n}, \quad (2.6.13)$$

$$\Delta f = f_y - f_{\text{ном}}, \quad (2.6.14)$$

Коэффициент несимметрии амплитудных значений фазных токов может быть определен [159, 42, 43], как (2.6.15) – (2.6.21).

$$k_i = \frac{I_{1m} - I_{2m}}{I_{1m}}, \quad (2.6.15)$$

где I_{1m} и I_{2m} – соответственно, амплитуды составляющих тока прямой и обратной последовательностей.

$$I_{1m} = \sqrt{2} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n i_{1i}^2}, \quad (2.6.16)$$

$$I_{2m} = \sqrt{2} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n i_{2i}^2}, \quad (2.6.17)$$

где i_{1i} и i_{2i} – соответственно, симметричные составляющие токов прямой и обратной последовательности.

$$\vec{i}_1 = \frac{1}{3} \left(\vec{i}_a + \vec{i}_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + \vec{i}_c e^{-j\frac{2\pi}{3}} \right), \quad (2.6.18)$$

$$\vec{i}_2 = \frac{1}{3} \left(\vec{i}_a + \vec{i}_b e^{-j\frac{2\pi}{3}} + \vec{i}_c e^{j\frac{2\pi}{3}} \right), \quad (2.6.19)$$

$$i_1 = |\vec{i}_1| = \sqrt{\operatorname{Re}(|\vec{i}_1|)^2 + \operatorname{Im}(|\vec{i}_1|)^2}, \quad (2.6.20)$$

$$i_2 = |\vec{i}_2| = \sqrt{\operatorname{Re}(|\vec{i}_2|)^2 + \operatorname{Im}(|\vec{i}_2|)^2}. \quad (2.6.21)$$

Вектора фазных токов определяются как (2.6.22).

$$\begin{cases} \vec{i}_a = I_{ma} \cos(2\pi ft) + jI_{ma} \sin(2\pi ft) \\ \vec{i}_b = I_{mb} \cos\left(2\pi ft + \frac{2\pi}{3}\right) + jI_{mb} \sin\left(2\pi ft + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \vec{i}_c = I_{mc} \cos\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}\right) + jI_{mc} \sin\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (2.6.22)$$

Амплитуда фазных токов может быть определена непосредственно по показаниям приборов, либо при известных мгновенных значениях тока в течение периода вычислена по формулам (2.6.23) – (2.6.25).

$$I_{ma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{T/\Delta t} i^2(t_i)}{\sum_{i=1}^{T/\Delta t} \sin^2(2\pi ft_i)}}, \quad (2.6.23)$$

$$I_{mb} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{T/\Delta t} i^2(t_i)}{\sum_{i=1}^{T/\Delta t} \sin^2\left(2\pi ft_i + \frac{2\pi}{3}\right)}}, \quad (2.6.24)$$

$$I_{mc} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{T/\Delta t} i^2(t_i)}{\sum_{i=1}^{T/\Delta t} \sin^2\left(2\pi ft_i - \frac{2\pi}{3}\right)}}, \quad (2.6.25)$$

Приведенные выражения соответствуют ГОСТ [50] и в дальнейшем используются при разработке алгоритмов диагностирования ЭМО комплексным методом.

2.7 Анализ изменений потребляемой электрической мощности

Поскольку, функционирование ЭМО основано балансе мощности, которая теряется в узлах и элементах ЭМО, повреждения приводят к увеличению потерь и снижению КПД. При повреждении ЭМО зависимость потерь от нагрузки (КПД) изменяется [105, 134, 329]. Контролируя изменения потерь для диагностируемого ЭМО за интервал времени возможно оценить изменение технического состояния, а статистические данные позволяют предопределить динамику изменений в дальнейшем. Информацию о видах и уровнях дефектов при этом несут дополнительные параметры, такие как результаты БПФ тока и мощности.

На основе накопления данных об электрических параметрах и эталонных значениях, сопоставленных с ресурсом ЭМО формируется комплексный метод диагностики, при этом алгоритмы диагностики и оценки остаточного ресурса будут основываться на сравнительной интеграции данных режимов работы, эталонных параметрах, диагностических признаках, извлекаемых из электрических сигналов.

Техническое состояние элементов ЭМО возможно оценить по изменениям усредненной величины потерь мощности во времени. Структурная схема определяет энергетические процессы в ЭМО ГиНГ (Рисунок 2.7.1), на ней изображены преобразователь электроэнергии (ЭП), электромеханический преобразователь (ЭМП) и механический преобразователь (МП).

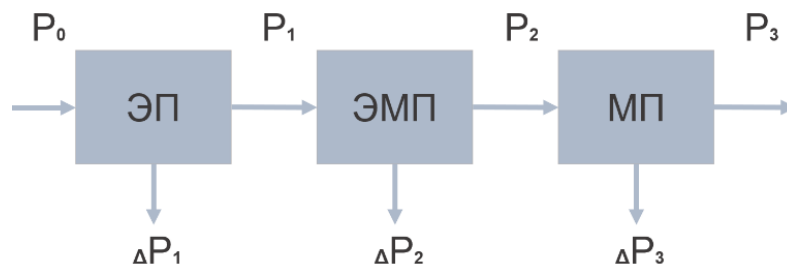


Рисунок 2.7.1 – Структурная схема энергетических преобразований в элементах ЭМО

Мощность P_{i-1} на выходе каждого преобразователя (2.7.1).

$$P_{i-1} = \eta_i \cdot P_i, \quad (2.7.1)$$

где P_i – мощность на входе блока, Вт;

η_i – коэффициент полезного действия преобразователя, определяемый как (2.7.2).

$$\eta_i = \frac{P_{i-1}}{P_i} = \frac{P_i - \Delta P_i}{P_i} = 1 - \frac{\Delta P_i}{P_i}, \quad (2.7.2)$$

где ΔP_i - величина потерь в преобразователе, Вт. Необходимо отметить, что слагаемое $\Delta P_i/P_i$ представляет собой величину потерь, отнесенную к потребляемой мощности соответствующего преобразователя.

Введем обозначение (2.7.3).

$$\rho_i = \frac{\Delta P_i}{P_i}. \quad (2.7.3)$$

При изменении мощности P_{i-1} , коэффициент полезного действия также меняется, при этом закономерность $\eta_i = \eta_i(P_{i-1})$ известна. Для определения зависимости величины ρ_i от отдаваемой мощности P_i (2.7.4)

$$\rho_i = 1 - \eta_i(P_i) = \rho_i(P_i). \quad (2.7.4)$$

ЭМО содержит три преобразователя, следовательно (2.7.5)

$$P_3 = \eta_3 \cdot \eta_2 \cdot \eta_1 \cdot P_0, \quad (2.7.5)$$

или (2.7.6).

$$P_3 = [1 - \rho_1(P_1)] \cdot [1 - \rho_2(P_2)] \cdot [1 - \rho_3(P_3)] \cdot P_0. \quad (2.7.6)$$

Обозначим дополнительные потери в преобразователе $\xi_i(P_i)$, тогда (2.7.7).

$$P_3 = [1 - \rho_1(P_1) - \xi_i(P_i)] \cdot [1 - \rho_2(P_2) - \xi_i(P_i)] \cdot [1 - \rho_3(P_3) - \xi_i(P_i)] \cdot P_0 \quad (2.7.7)$$

Экспериментально получены зависимости потерь электроэнергии от мощности при статической и динамической нагрузке (Рисунок 2.7.2) [169], что требует контроля нагрузки при сопоставлении режимов, в которых проводится оценка потерь. Статическая и динамическая составляющие характеризуют интенсивностью потерь мощности при статической нагрузке и динамической нагрузке.

Значение потерь ЭМО увеличивается при той же нагрузке при наличии дефектов, следовательно за показатель его технического состояния примем коэффициент изменения потерь, равный разнице относительных потребляемых ЭМО мощностей при определенной нагрузке (2.7.8).

$$\Delta \rho(P_2) = \frac{(P_{1 \text{ нач}} - P_{1 \text{ тек}})}{P_{1 \text{ нач}}}, \quad (2.7.8)$$

где $P_{1 \text{ нач}}$ – начальная величина мощности при нагрузке P_2 , технически исправного ЭМО или на начальной стадии эксплуатации, кВт;

$P_{1 \text{ тек}}$ – электрическая мощность ЭМО в текущий момент времени, при нагрузке P_2 , кВт.

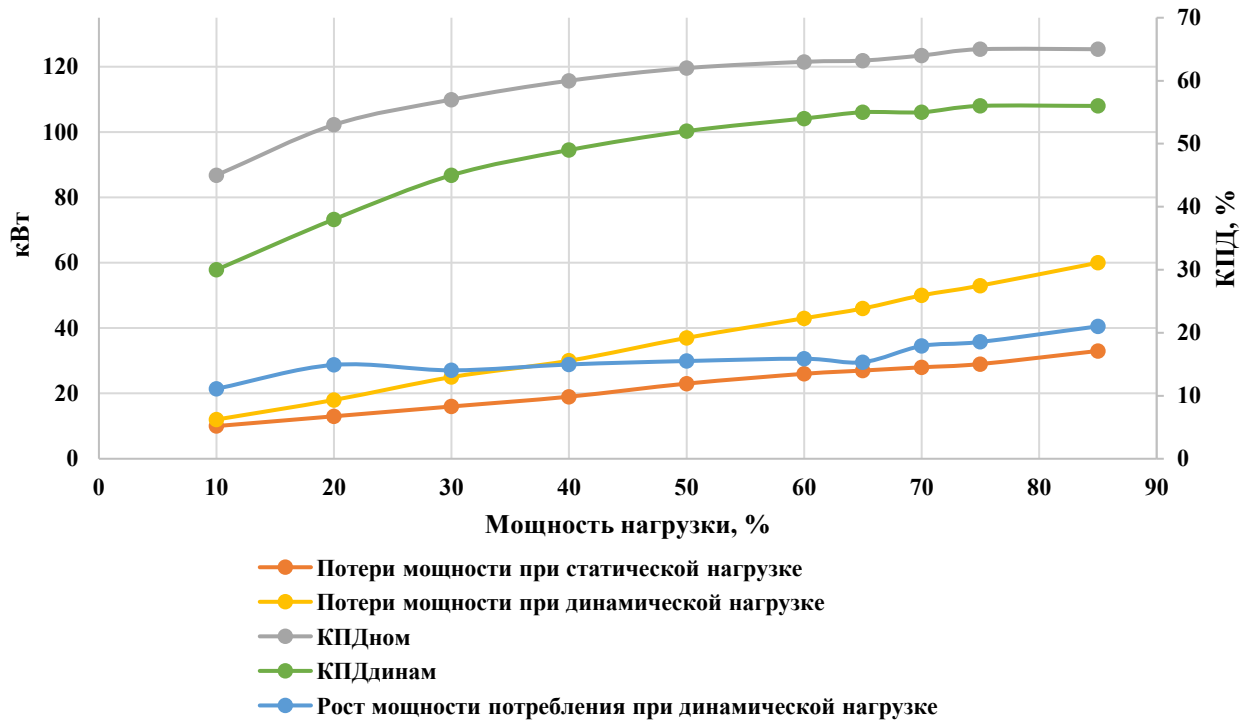


Рисунок 2.7.2 – Зависимость потерь в ЭМО от величины и вида нагрузки

К примеру, с достаточной для инженерных расчетов точностью нагрузка горнотранспортных машин представляется стационарным процессом с нормальным законом распределения [42].

Реализация предложенного метода осуществляется следующим образом. На начальной стадии эксплуатации производится N измерений потребляемой мощности, P_{1i} в течение заданного периода времени проведения (2.7.9).

$$\Delta t_i = \frac{T_d}{N}, \quad (2.7.9)$$

где T_d – время измерений, ч.

Средняя мощность ЭМО $\overline{P_1}$ и стандартное отклонение $S_{\overline{P_1}}$ рассчитывается по выражениям (2.7.10) – (2.7.14).

$$\overline{P_1} = \sum_{i=1}^N \frac{P_{1i}}{N}, \quad (2.7.10)$$

$$S_{\overline{P_1}} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(P_1 - P_{1i})^2}{N-1}}. \quad (2.7.11)$$

$$P_1 \in (P_{1\max}, P_{1\min}), \quad (2.7.12)$$

где

$$P_{1min} = \overline{P_1} - 3 \cdot S_{\overline{P_1}}, \quad (2.7.13)$$

$$P_{1max} = \overline{P_1} + 3 \cdot S_{\overline{P_1}}. \quad (2.7.14)$$

С интервалом $T_{ид}$, проводится измерение электрической мощности и рассчитываются средняя $\overline{P_1}'$, минимальная P'_{1min} , максимальная P'_{1max} , а также средняя величина коэффициента изменения потерь (2.7.15)

$$\Delta\rho_{cp} = \frac{\overline{P_1}' - \overline{P_1}}{P_{1ном}}, \quad (2.7.15)$$

где $P_{1ном}$ – номинальное значение механической мощности, кВт.

Коэффициент изменения потерь при минимальной и максимальной нагрузке (2.7.16) – (2.7.17).

$$\Delta\rho \frac{P'_{1min} - P_{1min}}{P_{1ном} \quad min}, \quad (2.7.16)$$

$$\Delta\rho \frac{P'_{1max} - P_{1max}}{P_{2ном} \quad max}. \quad (2.7.17)$$

Потери определенные по формулам (2.7.15) – (2.7.17) характеризуют ТС структурных элементов ЭМО, вероятность наличия дефекта определяться на основе статистических данных по отказам ЭМО данного типа с учётом выхода параметров за допустимые пределы.

В любых условиях работы АДКР потери в сердечнике оцениваются по следующим традиционным уравнениям Штейнметца (2.7.18).

$$P_{core} = k_h f B_m^x + k_e f^2 B_m^2, \quad (2.7.18)$$

где P_{core} – основные потери;

k_h, k_e, x – коэффициенты Штейнметца;

B_m – пик плотности магнитного потока.

Коэффициент Штейнметца можно определить по кривой максимальных потерь в сердечнике для шихтовки 2212 (предлагаемая шихтовка сердечника двигателя) на частотах 50 и 60 Гц (Рисунок 2.7.3).

Исходя из закона Фарадея, уравнение (2) можно переписать следующим образом (2.7.19).

$$P_{core} = K_h f^{1-x} e_{max}^2 + K_e e_{max}^2, \quad (2.7.19)$$

где K_h и K_e – новые коэффициенты Штейнметца, а e_{max} – максимальная электродвижущая сила ЭДС.

ЭДС получается следующим образом (2.7.20).

$$e(t) = u_s(t) - R_s i_s(t) - l_{ls} \frac{di_s(t)}{dt}, \quad (2.7.20)$$

где u_s – напряжение питания;

i_s – ток статора;

R_s – сопротивление обмотки статора;

l_{ls} – индуктивность утечки фазы статора.

Согласно (2.7.20), ЭДС зависит от тока статора, с другой стороны, потери в сердечнике зависят от максимальной ЭДС и нагрузки. Следовательно, потери в сердечнике зависят от тока, который изменяется в зависимости от нагрузки. Сравнение указанных зависимостей позволяет оценить величину дополнительных потерь, обусловленных развитием дефектов (Рисунок 2.7.3).

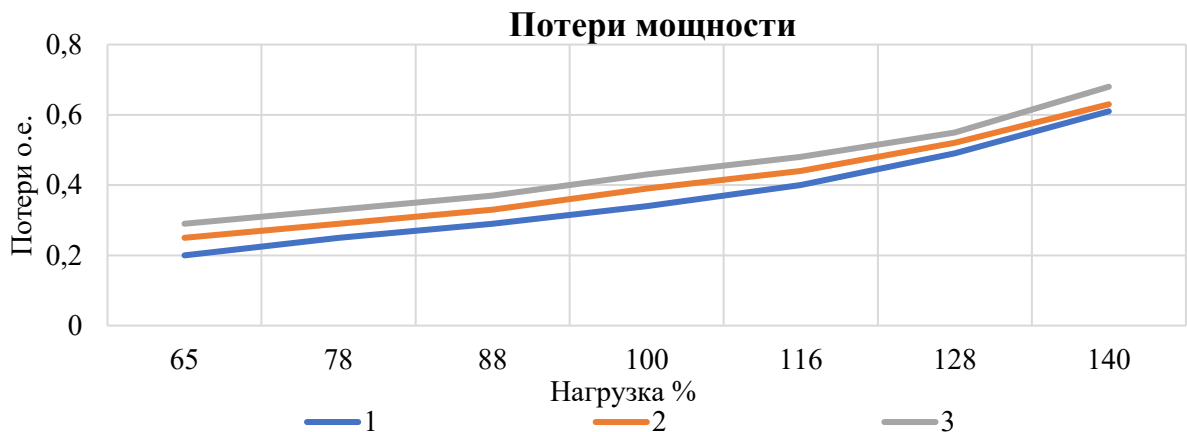


Рисунок 2.7.3 – Энергетические потери при различных неисправностях и условиях эксплуатации и вариации нагрузки; 3 – повреждено 6 стержней и ухудшенные условия эксплуатации; 2 – повреждено 2 стержня обмотки ротора; 1 – технически исправный двигатель при нормальных условиях эксплуатации

В качестве эталонного значения для сравнения может использоваться расчетное или смоделированное значение потерь, тогда разница между расчетным и измеренным значением при одной и той же нагрузке, определяет увеличение дополнительных потерь и ухудшение технического состояния, что необходимо нивелировать снижением мощности. Так на (Рисунок 2.7.4) приведены коэффициенты снижения для различного количества ОСР.

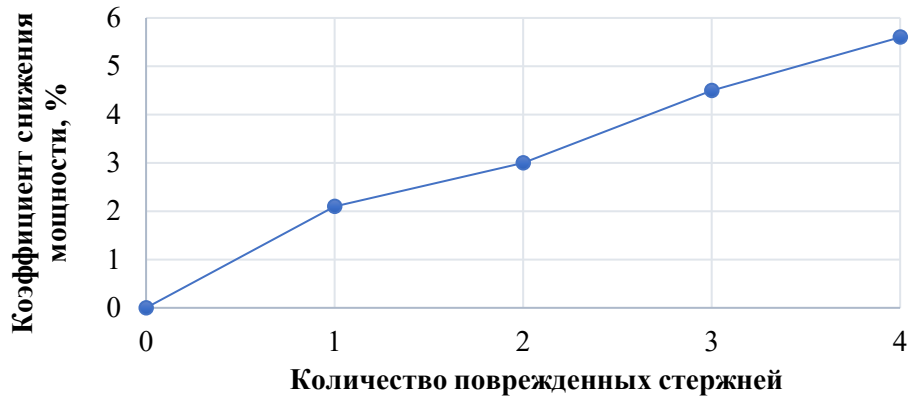


Рисунок 2.7.4 – Коэффициент снижения мощности для различного количества ОСР

Как уже отмечалось, если считать, что прирост температуры в критической точке пропорционален приросту потерь в меди статора асинхронного двигателя, то срок службы асинхронного двигателя можно оценить приблизительно так (2.7.21) – (2.7.22).

$$L_x = L_0 \cdot 2^{\left(\frac{T_b - R_{th} \cdot P_{loss}}{HIC}\right)}, \quad (2.7.21)$$

$$P_{loss} = 3R_s I_s^2, \quad (2.7.22)$$

где R_{th} – эквивалентное термическое сопротивление, °С/Вт;

P_{loss} – потери в меди обмотки статора асинхронного двигателя, Вт;

I_s – ток статора асинхронного двигателя, А;

R_s – сопротивление статора асинхронного двигателя, Ом.

В качестве примера определения эталонной характеристики, учитывающей условия эксплуатации (Рисунок 2.7.5), проведено моделирование асинхронного двигателя мощностью 5,5 кВт, 50 Гц с изоляцией класса F для оценки срока службы асинхронного двигателя при различных условиях колебаний напряжения и различных уровнях нагрузки.

По параметрам АД можно рассчитать момент при полной нагрузке и ток статора при нормальном режиме питания на основе момента нагрузки. При постоянном изменении величины напряжения питания на 10% можно также оценить и суммировать среднеквадратичный ток статора асинхронного двигателя в зависимости от различных уровней крутящего момента нагрузки. При одинаковом моменте нагрузки среднеквадратичный ток статора асинхронного

двигателя значительно увеличивается с ростом частоты модуляции как при малой, так и при полной нагрузке. Например, при частоте модуляции 5 Гц среднеквадратичный ток статора составляет 5 А при моменте нагрузки 10 Н·м, однако при частоте модуляции 35 Гц ток возрастает до 6,9 А. При полном моменте нагрузки это число изменяется с 10 А до 11,2 А.

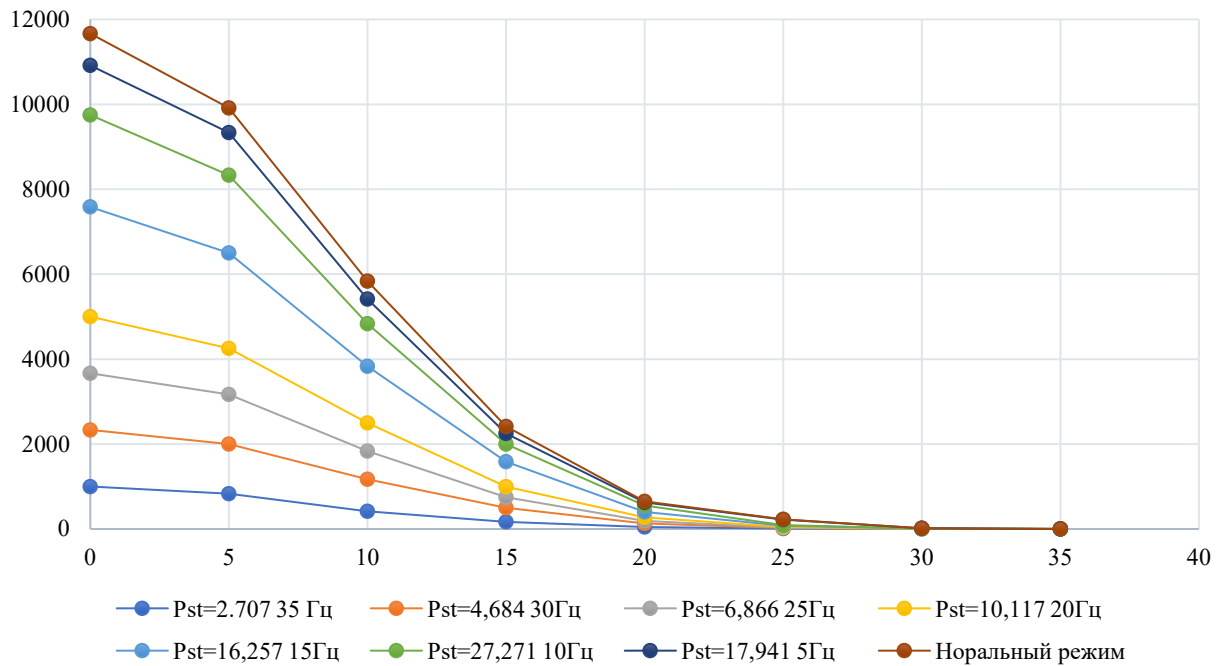


Рисунок 2.7.5 – Оценка срока службы ЭД при постепенном увеличении момента нагрузки, изменении величины напряжения на 10% и различной частоте модуляции.

Очевидно, что с увеличением нагрузки срок службы асинхронного двигателя сильно уменьшается, как при нормальном напряжении питания, так и при колебаниях напряжения. С другой стороны, при линейном увеличении частоты модуляции срок службы двигателя значительно снижается как для момента малой нагрузки, так и для момента полной нагрузки. При постоянном изменении величины напряжения (10%) снижение срока службы происходит пропорционально увеличению частоты модуляции с учетом как малой, так и полной нагрузки.

С увеличением коэффициента изменения напряжения и частоты модуляции ток статора асинхронного двигателя будет быстро возрастать, особенно в диапазоне более высокого изменения напряжения и более высокой частоты модуляции.

2.7.1 Анализ поведения асинхронного электропривода при изменении параметров схемы замещения

В условиях межвитковых замыканий в обмотке статора возникает асимметрия фазных напряжений и отклонение параметров схемы замещения от номинальных значений. Однако наличие данного дефекта не приводит к реагированию систем защит по току и напряжению, поскольку значения токов и напряжений не превышают уставок.

При эксплуатации в продолжительном $S1$ режиме и отсутствии перехода в режим холостого хода при межвитковых замыканиях в статоре возникает рассогласование в настройке регулятора, что снижает изначально достигнутую при проектировании эффективность ЭМО. Для оценки изменения динамических, механических и энергетических характеристик ЭМО при наличии дефекта построена имитационная модель [17].

Силовая часть преобразователя со скалярной системой управления, замкнутая по частоте вращения, представлена двухзвенной структурой с неуправляемым выпрямителем и 6-ти пульсным 2-х уровневым инвертором напряжения (Рисунок 2.7.6).

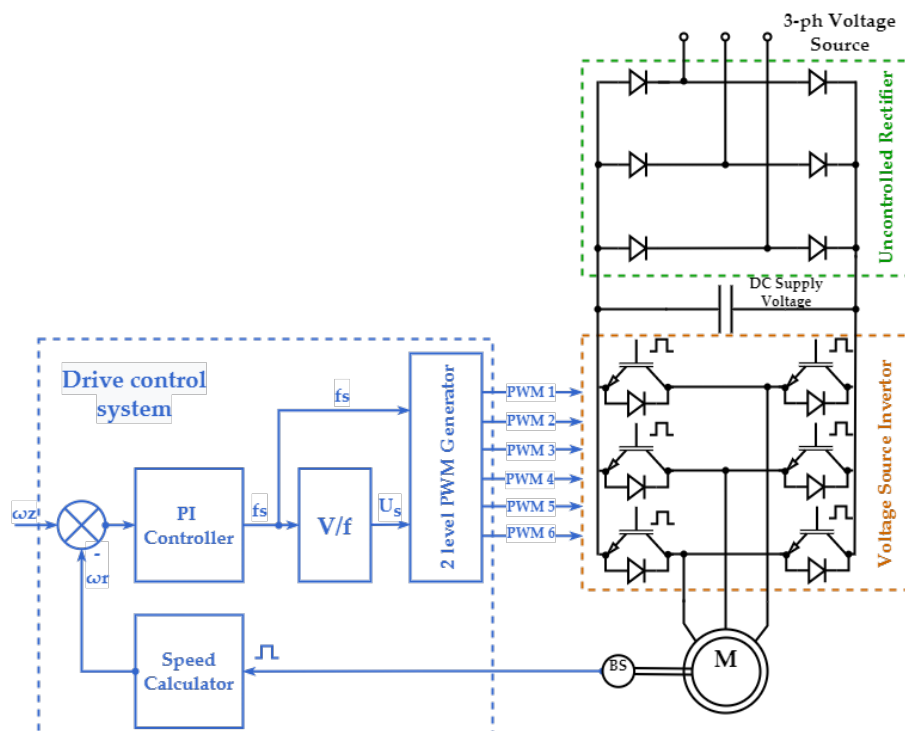


Рисунок 2.7.6 – Структура скалярной системой управления электроприводом замкнутая по частоте вращения

В качестве приводного электродвигателя использовали асинхронный двигатель общепромышленного назначения серии АИР 315 с номинальными параметрами (Таблица 2.7.1).

Таблица 2.7.1 – Номинальные параметры асинхронного двигателя

Мощность P , Вт	Напряжение питания U_n , В	Скорость ротора n , рад/с	Кол-во пар полюсов z	Момент инерции J , кг*м ²	η	$\cos\varphi$	K_m	K_p	K_i
132000	380	1450	2	1.5	0.9	0.86	3.0	3.0	3.0

Примечание: $\cos\varphi$ – коэффициент мощности; η – коэффициент полезного действия; K_m – перегрузочная способность; K_p – кратность пускового момента; K_i – кратность пускового тока.

В соответствии с паспортными данными (Таблица 2.7.1) и измерениями выполнен расчет уточненных параметров схемы замещения [31, 37, 157]. Результаты расчета сведены в таблицу 2.7.2.

Таблица 2.7.2 – Параметры схемы замещения асинхронного двигателя

L_s Гн	L_r Гн	L_m Гн	R_s Ом	R_r Ом
0.1453	0.1473	0.1400	0.5212	0.3051

Примечание: L_s – индуктивность намагничивания статора, Гн; L_r – индуктивность намагничивания ротора, Гн; L_m – взаимная индуктивность намагничивания, Гн; R_s – активное сопротивление статора, Ом; R_r – активное сопротивление ротора, Ом.

Математическое описание асинхронного двигателя в неподвижной системе координат $\alpha\beta$ представлено системой уравнений (2.7.23), включающими уравнения электромагнитного равновесия, уравнения связей токов с потокосцеплением и уравнениями электромагнитного момента и движения [31]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} = U_{s\alpha} - R_s I_{s\alpha} \\ \frac{d\psi_{s\beta}}{dt} = U_{s\beta} - R_s I_{s\beta} \\ \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} = -R_s I_{s\alpha} - \omega_r \psi_{r\beta} \\ \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} = -R_s I_{s\beta} + \omega_r \psi_{r\alpha} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} I_{s\alpha} = \frac{1}{\sigma L_s} \psi_{s\alpha} - \frac{k_r}{\sigma L_s} \psi_{r\alpha} \\ I_{s\beta} = \frac{1}{\sigma L_s} \psi_{s\beta} - \frac{k_r}{\sigma L_s} \psi_{r\beta} \\ I_{r\alpha} = -\frac{k_r}{\sigma L_r} \psi_{s\alpha} + \frac{1}{\sigma L_r} \psi_{r\alpha} \\ I_{r\beta} = -\frac{k_r}{\sigma L_r} \psi_{s\beta} + \frac{1}{\sigma L_r} \psi_{r\beta} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} M = 1.5zL_m(I_{r\alpha}I_{s\beta} - I_{r\beta}I_{s\alpha}) \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{M - M_c}{J} \end{array} \quad (2.7.23)$$

где $\psi_{s\alpha}$, $\psi_{s\beta}$, $\psi_{r\alpha}$, $\psi_{r\beta}$ – проекции вектора потокосцепления статора и ротора на оси системы координат $\alpha\beta$, Вб;

$U_{s\alpha}, U_{s\beta}, U_{r\alpha}, U_{r\beta}$ – проекции вектора напряжения статора и ротора на оси системы координат $\alpha\beta$, В;

$I_{s\alpha}, I_{s\beta}, I_{r\alpha}, I_{r\beta}$ – проекции вектора тока статора и ротора на оси системы координат $\alpha\beta$, А;

R_s, R_r – активное сопротивление обмотки статора и ротора, Ом;

ω_r – частота вращения ротора, (рад/с);

σ – коэффициент рассеяния, о.е.;

$k_s = L_m/L_s$ – коэффициенты рассеяния статора, о.е.;

$k_r = L_m/L_r$ – коэффициенты рассеяния ротора, о.е.

Поведение системы электропривода было исследовано при изменении индуктивности цепи намагничивания L_m в диапазоне от 0,7 до 1,1 от номинального значения с оценкой частоты вращения, электромагнитного момента, токов и потокосцепления с выходом на номинальную скорость вращения и дальнейшим кратковременным набросом номинальной нагрузки (в момент времени $t=6$ с) и последующим набросом максимальной нагрузки (в момент времени $t = 7$ с) в несколько этапов.

Изменение индуктивности цепи намагничивания в данном диапазоне 0,7-1,1 L_m связано с межвитковыми замыканиями в лобовых частях обмотки статора. В ходе экспериментов межвитковое замыкание было создано в одной из фаз статора электродвигателя (Таблица 2.16 и Таблица 2.17), имеющего схему укладки обмоток (Рисунок 2.7.7 а). При помощи реостата R_{sc} замыкалось n количество витков по схеме (Рисунок 2.7.7 б), за счет чего создавалось эквивалентное межвитковое замыкание при ограничении фазного тока до допустимых значений.

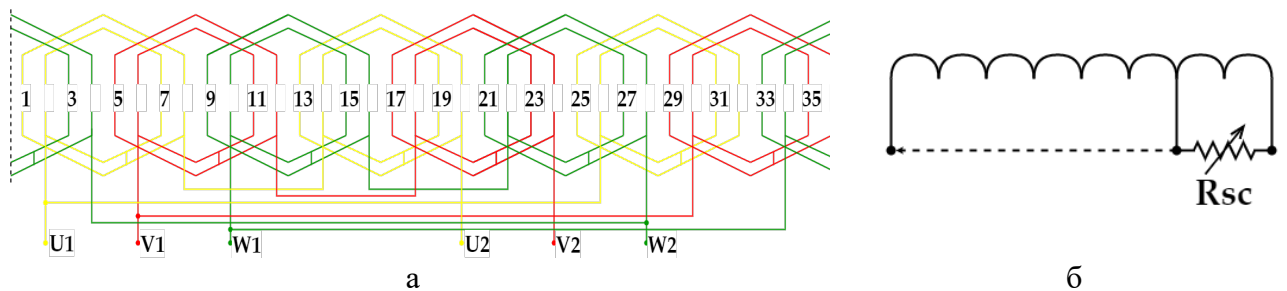


Рисунок 2.7.7 – Статор асинхронного двигателя АИР 315: а – схема укладки обмоток статора (U1; V1; W1; U1; V1; W1 – начало и концы обмоток фаз); б – схема межвиткового замыкания

Межвитковое замыкание приводит к изменению параметров схемы замещения и, в результате, к изменению L_m . В исследовании было выполнено моделирование электропривода без управления и со скалярной системой управления, замкнутой по частоте вращения при изменениях L_m для оценки энергетических и механических характеристик.

На первом этапе выполнялось моделирование работы асинхронного двигателя с учётом формул (2.7.23) без управления. При постепенном изменении L_m с шагом $\sim 10\%$ фиксировались механические характеристики электропривода (Рисунок 2.7.8):

1) Повышение L_m на 10% повышает скорость разгона, что сопровождается ростом амплитуды пускового электромагнитного момента;

2) Снижение L_m на 10% приводит к увеличению в 2 раза времени разгона до номинальной скорости при этом электродвигатель не может сформировать электромагнитный момент при максимальной нагрузке;

3) Снижение L_m на 20% приводит к увеличению в ~ 5 раз времени разгона до номинальной скорости, при этом электродвигатель не может сформировать электромагнитный момент при нагрузке;

4) Снижение L_m до 30% не обеспечивает формирование номинальной частоты вращения и электромагнитного момента, ввиду снижения моментобразующего тока статора (Рисунок 2.7.9) и потокосцепления ротора (Рисунок 2.7.10) в результате ослабления электромагнитного поля в воздушном зазоре.

Энергетические характеристики нерегулируемого электропривода оценивались с учетом коэффициента полезного действия (КПД), коэффициента мощности (K_M), потребляемой активной (P), реактивной (Q) и полной (S) мощностей (Таблица 2.7.3).

Повышенное значение L_m , связанное с ошибочным определением значения при вводе в эксплуатацию параметров, приводит к улучшению энергетических характеристик при номинальной и максимальной нагрузке, в частности к снижению потребляемых мощностей P , Q , S , увеличению КПД, увеличению K_M

(коэффициент мощности) при максимальной нагрузке (Рисунок 2.7.11). Снижение значения L_m при возникновении межвиткового замыкания приводит к ухудшению энергетических характеристик (Рисунок 2.7.11).

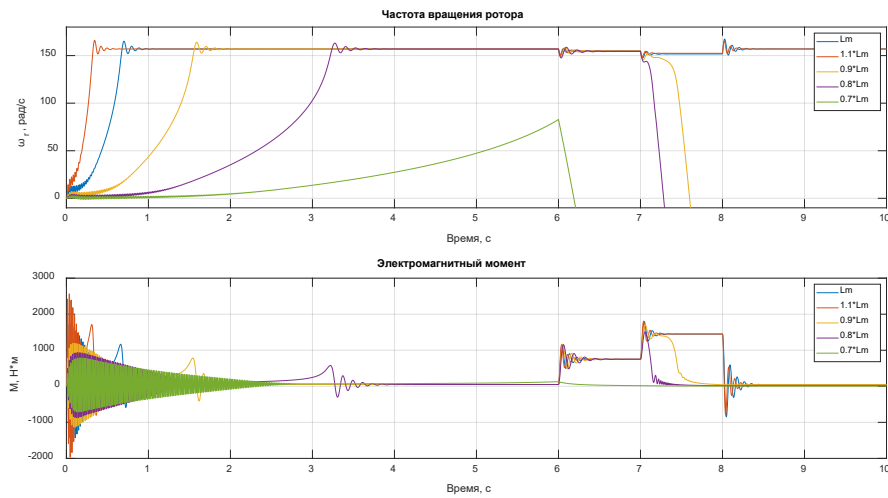


Рисунок 2.7.8 – Скорость вращения ротора и электромагнитный момент

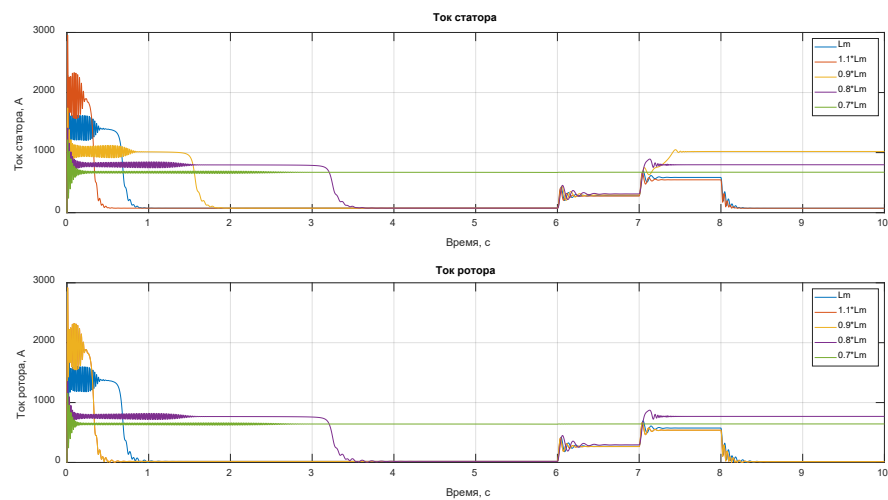


Рисунок 2.7.9 – Токи статора и ротора

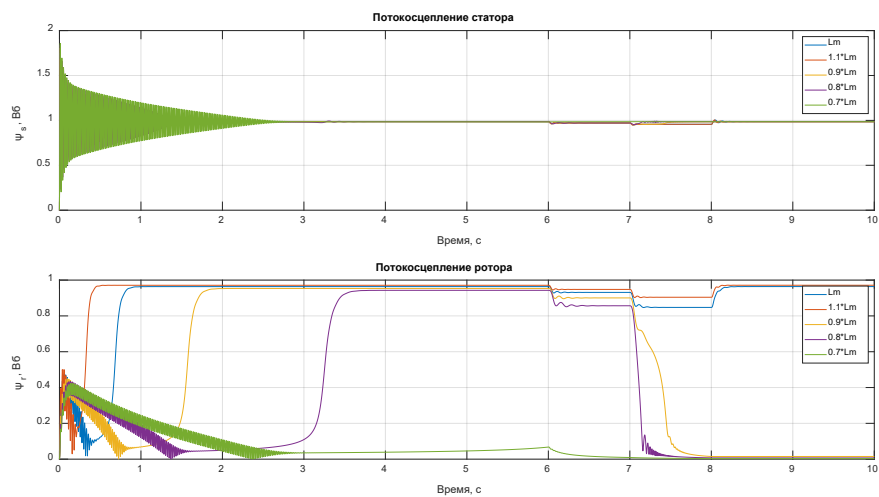
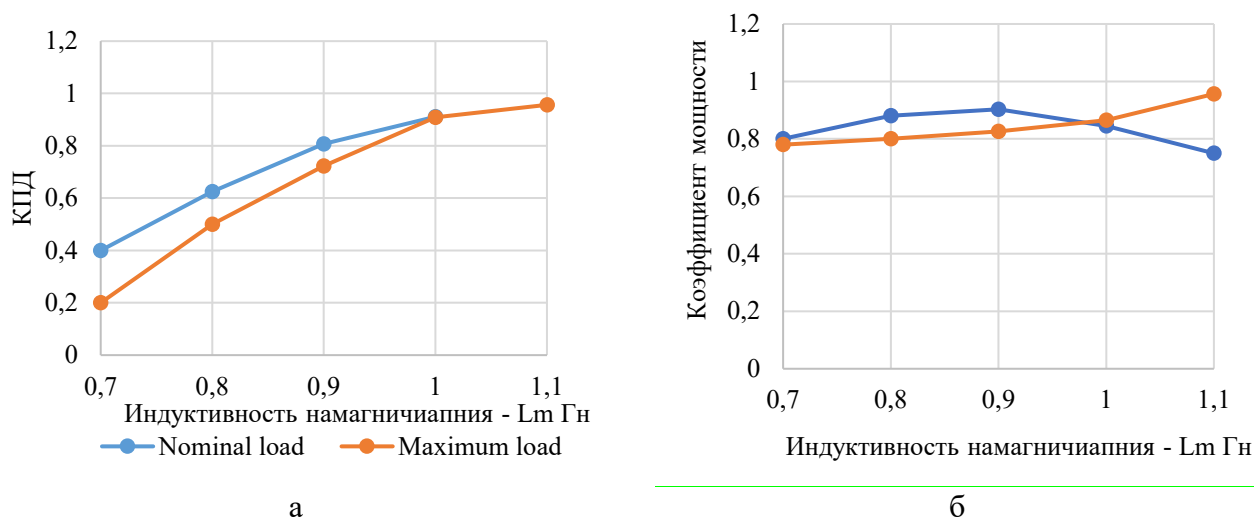


Рисунок 2.7.10 – Потокоцепление статора и ротора

Таблица 2.7.3 – Энергетические параметры асинхронного двигателя при изменении L_m

Параметр	Нагрузка	L_m Гн				
		1,1	1	0,9	0,8	0,7
Кэф. мощности	номин.	0,9565	0,9109	0,8068	0,6249	0,4
	макс.	0,9565	0,9083	0,7234	0,5	0,2
КПД	номин.	0,75	0,8453	0,9031	0,8808	0,8
	макс.	0,9565	0,8646	0,8265	0,8	0,78
P, Вт	номин.	130700	145100	162800	207000	х
	макс.	203200	227500	260500	586400	х
Q, ВАр	номин.	60110	67160	77380	111300	х
	макс.	107700	132200	177500	574400	х
S, ВА	номин.	143800	159900	180200	235000	х
	макс.	230000	263100	315200	598400	х

Рисунок 2.7.11 – Энергетические характеристики асинхронного двигателя при изменении L_m

На втором этапе моделирования питание двигателя осуществлялось от полупроводникового преобразователя частоты со скалярной системой, замкнутой по частоте вращения ротора по средствам датчика скорости.

Изменение L_m с шагом $\sim 10\%$, привели к изменениям механических характеристики электропривода:

1) Разгон поддерживается на всем диапазоне изменения L_m , ввиду замкнутого контура и оптимальной настройки регулятора (Рисунок 2.7.12).

2) При снижении L_m до 20% электродвигатель не может сформировать электромагнитный момент при максимальной нагрузке из-за нарастающего рассогласования в настройке регулятора и отсутствия контура регулирования тока статора.

3) Снижение L_m до 30% не обеспечивает формирование номинального электромагнитного момента, ввиду снижения тока статора (Рисунок 2.7.12) и потокосцепления ротора (Рисунок 2.7.13) в результате ослабления электромагнитного поля в воздушном зазоре.

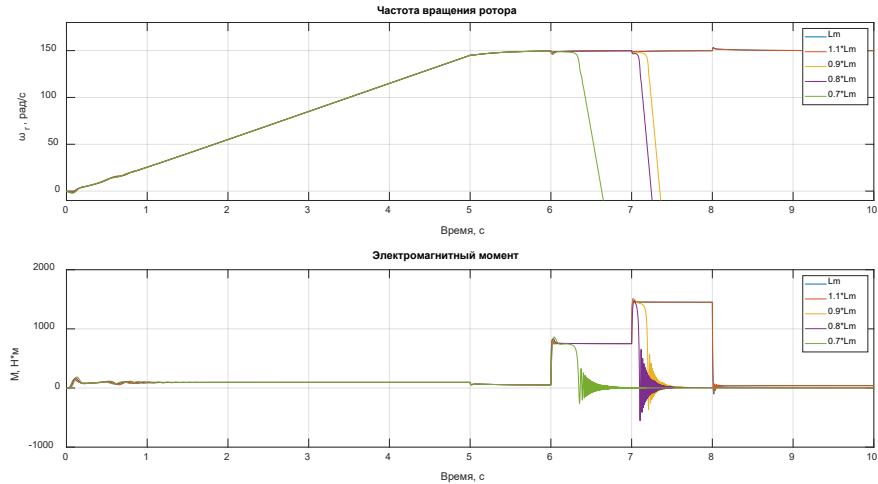


Рисунок 2.7.12 – Частота и момент

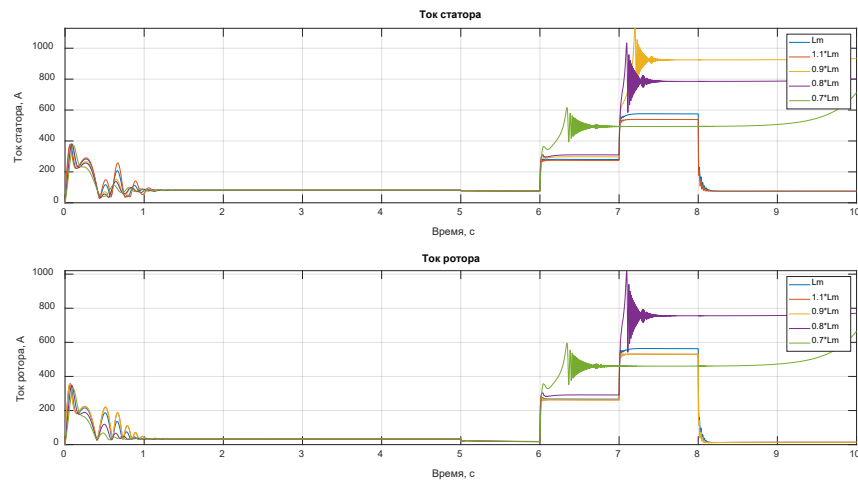


Рисунок 2.7.13 – Ток статора и ротора

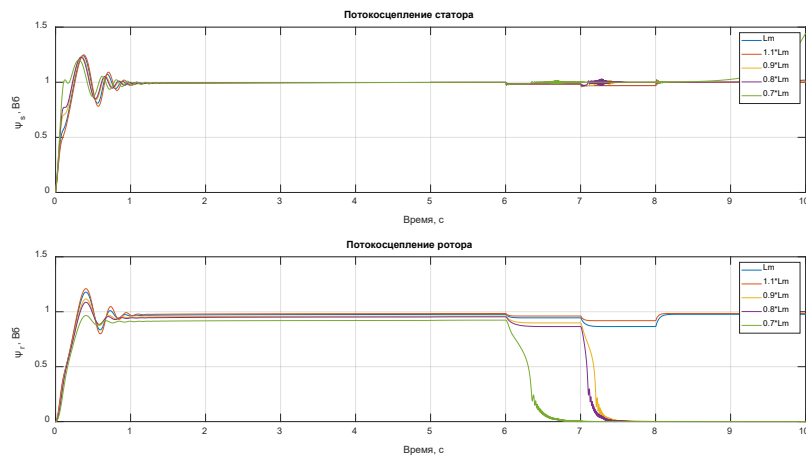
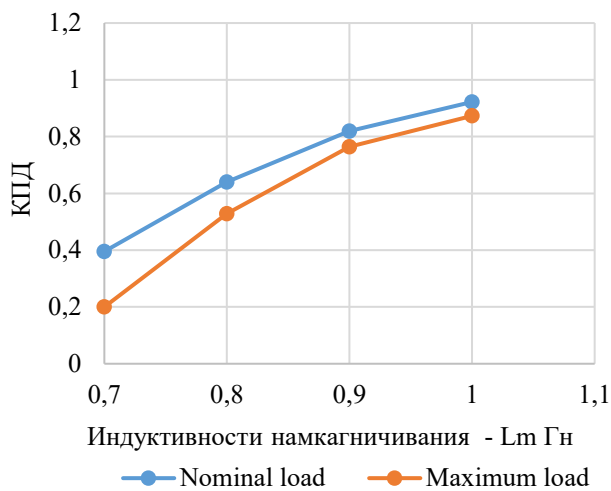


Рисунок 2.7.14 – Поток статора и ротора

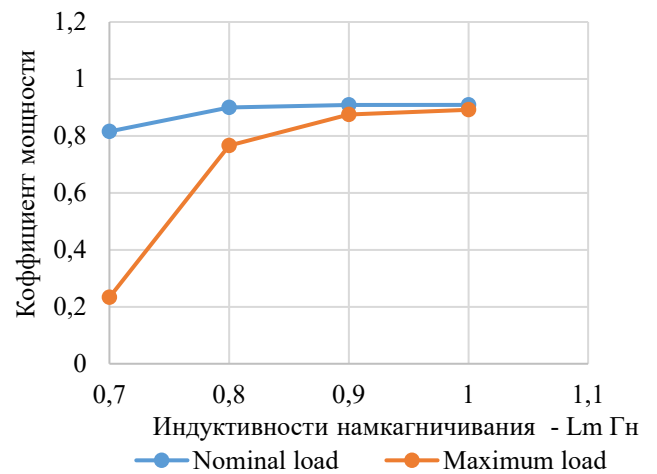
Анализ энергетических характеристик электропривода со скалярной системой управления при питании асинхронного двигателя от автономного инвертора напряжения имеет схожую динамику снижения энергетических характеристик (Таблица 2.7.4) и (Рисунок 2.7.15) с первым этапом. Однако с ростом нагрузки и с уменьшением L_m КПД и коэффициент мощности K_M имеют крутопадающую характеристику по сравнению с нерегулируемым электроприводом. Потребление мощности (Рисунок 2.7.15 б) при этом характеризуется более плавным характером нарастания на большем диапазоне изменения L_m .

Таблица 2.7.4 – Энергетические параметры электропривода при изменении L_m

Параметр	Нагрузка	L_m , Гн				
		1,1	1	0,9	0,8	0,7
K_M	номин.	х	0,922	0,819	0,640	0,395
	макс.	х	0,873	0,763	0,528	0,2
КПД	номин.	х	0,908	0,908	0,899	0,815
	макс.	х	0,891	0,875	0,766	0,233
P, Вт	номин.	х	137400	154000	194800	300400
	макс.	х	213000	241000	326300	658500
Q, ВАр	номин.	х	63130	70770	94650	213400
	макс.	х	108100	133000	280800	661200
S, ВА	номин.	х	151200	169500	216600	368500
	макс.	х	238900	275300	431100	679900



а



б

Рисунок 2.7.15 – Энергетические характеристики электропривода при изменении L_m

Снижение значения L_m при возникновении межвиткового замыкания, как одного из возможных неисправностей АД, приводит к ухудшению энергетических характеристик, а с ростом нагрузки ухудшение энергетических характеристик происходит интенсивнее.

Имитационное моделирование подтвердило влияние уровня дефекта в виде межвиткового замыкания обмотки статора на характеристики режимов работы электропривода и устойчивость системы управления. Представленный подход учета моделирования позволяет при невозможности экспериментальных исследований оценить динамические, энергетические и механические характеристики при наличии дефектов для использования их в качестве эталонных с учетом отстройки от условий эксплуатации. Проведенные исследования показали, что вид и интенсивность проявления неисправностей АДКР связаны с ростом потребляемой (активной, реактивной, полной) мощности (Рисунок 2.7.16).

Использование эталонных моделей позволяет определить допустимые условия выполнения требуемых функций (поддержание частоты вращения, формирование электромагнитного момента). Совмещение экспериментальных данных и результатов моделирования позволяет выполнить исследования при условии небезопасной работы оборудования, в том числе в условиях ГиНПП при межвитковых замыканиях в статоре, что позволяет имитировать процессы изменения скорости ротора, электромагнитного момента, токов и потоков статора и ротора в динамике и оценить результаты воздействия на скалярную систему управления и электропривод. В свою очередь ухудшение механических и энергетических характеристик электропривода заключается в нарастающем, при возникновении дефекта, рассогласовании настроечных параметров регуляторов. Для устранения указанного явления необходима их перенастройка, что в продолжительных режимах работы (без остановки или на холостом ходу) невозможно выполнить.

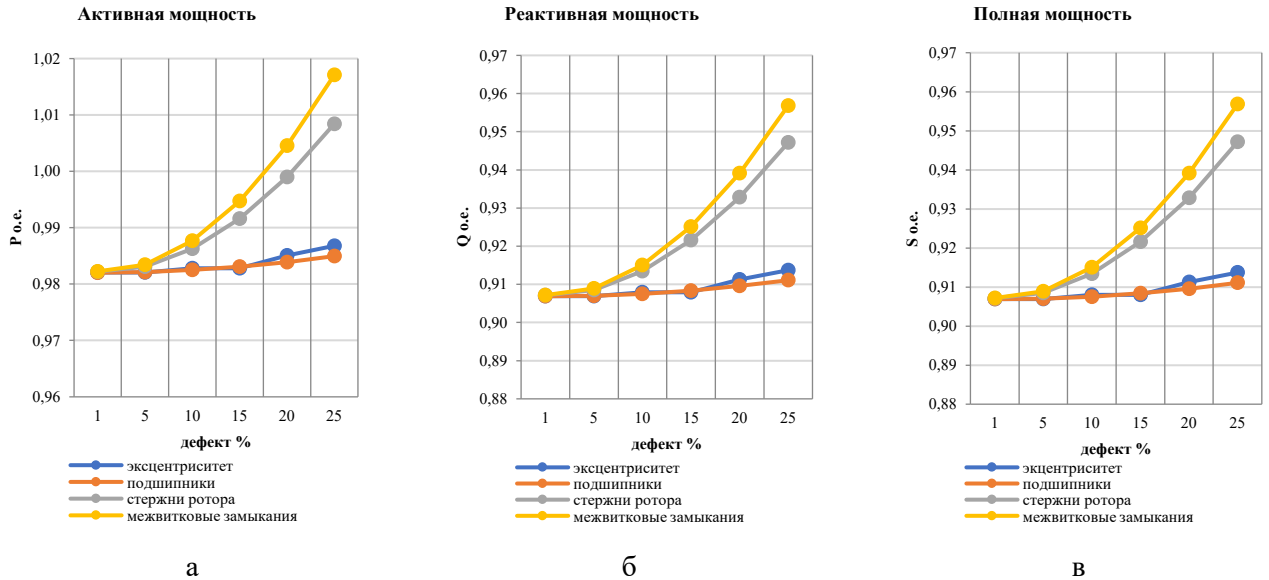


Рисунок 2.7.16 – Зависимость мощности АДКР при вариации вида и величины повреждения: а – активная мощность, Вт; б – реактивная мощность, Вар; в – полная мощность, ВА

2.7.2 По спектру потребляемой мощности

Мгновенная мощность используется в качестве сигналов для анализа характеристик двигателя, ориентированного на обнаружение механических неисправностей в системе привода. Количество информации, которую несет мгновенная мощность, которая является произведением напряжения питания и тока двигателя, выше, чем-то, которое можно получить только из тока. Фактически, помимо основной составляющей и двух классических составляющих боковой полосы, мгновенный спектр мощности содержит дополнительную составляющую непосредственно на частоте модуляции (2.7.24).

$$p(t) = p_0(t) + \frac{MU_{LL}I_L}{2} \left\{ \begin{array}{l} \cos \left[(2\omega + \omega_{osc})t - \varphi - \frac{\pi}{6} \right] + \\ + \cos \left[(2\omega - \omega_{osc})t - \varphi - \frac{\pi}{6} \right] + 2\cos \left(\varphi + \frac{\pi}{6} \right) \cos (\omega_{osc}t) \end{array} \right\}, \quad (2.7.24)$$

где $p_0(t)$ – основная составляющая мгновенное значение мощности, Вт;

M – коэффициент модуляции, о.е.;

U_{LL} – среднеквадратичное значение линейного напряжения, В;

I_L – фазный ток, А;

ω_{osc} – частота колебаний.

Фактически все гармоники неисправности переводятся в полосу частот 0-100 Гц. Это представляет собой большое преимущество, поскольку область гармоник неисправности хорошо ограничена. Однако спектры мощности по-прежнему зашумлены, так как БПФ мгновенной мощности на данном этапе не дает существенного улучшения.

В эксперименте с номинальной нагрузкой в нормальных условиях и при различных неисправностях с ОСР электрический тормоз регулируется с помощью регулятора нагрузки для поддержания работы АДКР с номинальной нагрузкой, при этом измеряются крутящий момент, скорость (Таблица 2.7.5).

Момент нагрузки АДКР (Таблица 2.7.5) остается в основном постоянным, однако при оборванных стержнях ротора частота вращения и выходная мощность уменьшаются с увеличением числа сломанных стержней.

Таблица 2.7.5 – Выходные параметры экспериментального двигателя

Рабочее состояние	Крутящий момент/(Н·м)	Скорость, об/мин	Мощность, кВт
Нормальное	-49,446	1450,1	7,509
1 оборванный стержень	-49,464	1448,0	7,500
2 оборванных стержня	-49,451	1444,5	7,480

Построенные на примере фазы А осциллограммы напряжения, тока и входной мощности статора, измеренные в ходе экспериментов, представлены соответственно (Рисунок 2.7.17 – Рисунок 2.7.19).

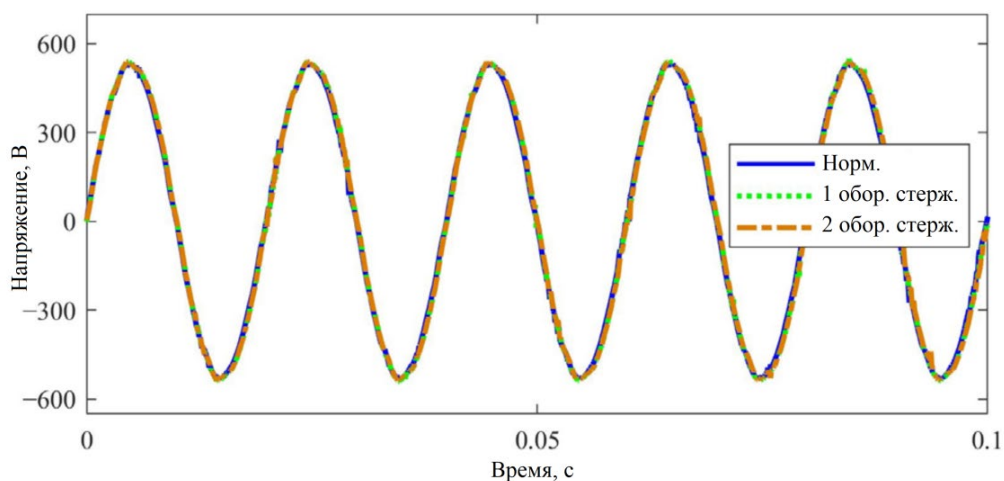


Рисунок 2.7.17 – Напряжение статора

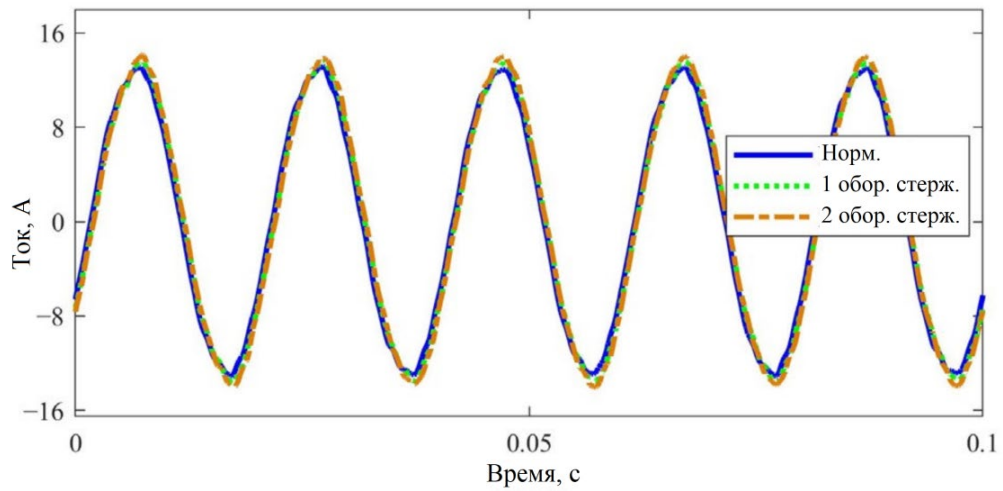


Рисунок 2.7.18 – Ток статора

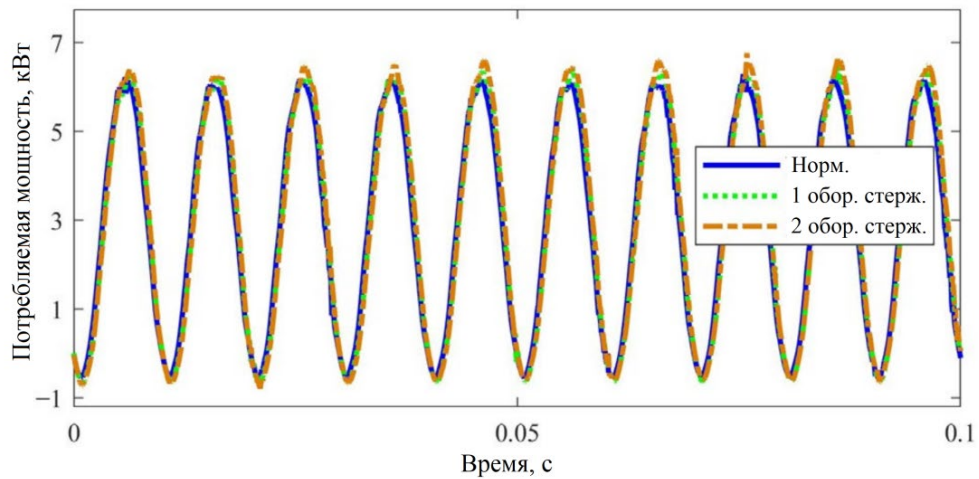


Рисунок 2.7.19 – Потребляемая мощность

Видно, что при неисправности с ОСР увеличиваются как ток статора, так и потребляемая мощность, причем амплитуда потребляемой мощности имеет незначительные колебания. При увеличении числа оборванных стержней вышеописанное явление становится еще более очевидным.

При проведении частотного анализа выявляется вид неисправности, который приводит к увеличению потерь электроэнергии [77, 198, 288].

При частотном анализе рассчитываются:

– потери мощности на частотах в спектре, которые характеризуют величину повреждения (2.7.25).

$$\Delta\rho(\omega_i) = \frac{\overline{P_1'(2\omega_i)} - \overline{P_1(2\omega_i)}}{P_{1нач}}, \quad (2.7.25)$$

– среднеквадратичное значение (СКЗ) и пик-фактор в пределах диапазона, характеризуют вид повреждения (2.7.26) – (2.7.28).

$$P_{СКЗi} = \frac{1}{\Omega} \int_{\omega_i - \Delta\omega_i}^{\omega_i + \Delta\omega_i} P(\omega) d\omega, \quad (2.7.26)$$

$$\Omega = \int_{\omega_i - \Delta\omega_i}^{\omega_i + \Delta\omega_i} \omega d\omega, \quad (2.7.27)$$

$$P_{ПИКИ} = \frac{\max_{\omega \in (\omega_i - \Delta\omega_i, \omega_i + \Delta\omega_i)} [P(\omega)]}{\frac{1}{\Omega} \int_{\omega_i - \Delta\omega_i}^{\omega_i + \Delta\omega_i} P(\omega) d\omega}. \quad (2.7.28)$$

Для верификации и повышения точности диагностики ЭМО, целесообразно использовать совместно с электрическими параметрами и другие методы, в частности методы виброакустической диагностики [21, 98, 150].

Мощность потерь электроэнергии, сопоставленная с видами дефектов, определяется (2.7.29).

$$\begin{cases} p_{d1j}(t) = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l \left[\frac{I_{d1j}}{k_{mjk}} \cdot \sin(k \cdot \omega_{d1j} \cdot t) \right] \cdot (U_n \cdot \sin(n \cdot \omega_1 \cdot t) + \sum_{m=1}^{m=\infty} U_m \cdot \sin(m \cdot \omega_H \cdot t) + \sum_{m=1}^{m=\infty} \sum_{n=1}^{n=\infty} U_{nm} \cdot \sin(m \cdot \omega_H \pm v \cdot \omega_1) \cdot t) \\ p_{d2j}(t) = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l \left[\frac{I_{d2j}}{k_{mjk}} \cdot \sin(k \cdot \omega_{d2j} \cdot t) \right] \cdot (U_n \cdot \sin(n \cdot \omega_1 \cdot t) + \sum_{m=1}^{m=\infty} U_m \cdot \sin(m \cdot \omega_H \cdot t) + \sum_{m=1}^{m=\infty} \sum_{n=1}^{n=\infty} U_{nm} \cdot \sin(m \cdot \omega_H \pm v \cdot \omega_1) \cdot t) \\ p_{d3j}(t) = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l \left[\frac{I_{d3j}}{k_{mjk}} \cdot \sin(k \cdot \omega_{d3j} \cdot t) \right] \cdot (U_n \cdot \sin(n \cdot \omega_1 \cdot t) + \sum_{m=1}^{m=\infty} U_m \cdot \sin(m \cdot \omega_H \cdot t) + \sum_{m=1}^{m=\infty} \sum_{n=1}^{n=\infty} U_{nm} \cdot \sin(m \cdot \omega_H \pm v \cdot \omega_1) \cdot t) \\ p_{d4j}(t) = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l \left[\frac{I_{d4j}}{k_{mjk}} \cdot \sin(k \cdot \omega_{d4j} \cdot t) \right] \cdot (U_n \cdot \sin(n \cdot \omega_1 \cdot t) + \sum_{m=1}^{m=\infty} U_m \cdot \sin(m \cdot \omega_H \cdot t) + \sum_{m=1}^{m=\infty} \sum_{n=1}^{n=\infty} U_{nm} \cdot \sin(m \cdot \omega_H \pm v \cdot \omega_1) \cdot t) \end{cases}, \quad (2.7.29)$$

где f_1, f_H – основная и несущая частоты, Гц;

I_n, U_n – амплитудные значения гармоник тока и напряжения А, В, кратные основной частоте вращения $\omega_1 = 2\pi f_1$, рад/с;

I_m, U_m – амплитуды гармоник тока и напряжения А, В, кратные несущей частоте $\omega_H = 2\pi f_H$, рад/с;

$n = k \cdot 6 \pm 1 = 1, 5, 7, 11, 13 \dots$ – номера гармоник;

I_{nm}, U_{nm} – амплитуды комбинационных гармоник тока и напряжения А, В, вызванных взаимодействием основной и несущей частот;

$m = 1, 2, 3 \dots$ и $v = 1, 2, 4, 5, 7 \dots$ – кратность основной ω_1 и несущей ω_H частот.

Численно спектрограмма мгновенной потребляемой мощности может быть оценена обобщенным показателем коэффициент гармонического искажения мощности (2.7.30).

$$K_{\Gamma P} = \frac{\sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^l \lambda_j \sqrt{\int_{\omega_j - \Delta\omega_j}^{\omega_j + \Delta\omega_j} P^2(\omega) d\omega}}{P(\omega_0)}, \quad (2.7.30)$$

где m – число фаз;

l – число частотных поддиапазонов;

$P(\omega)$ – мощность на данной частоте, Вт;

ω_j – центральная частота j -го диапазона;

$\Delta\omega_j$ – ширина j -го диапазона;

λ_j – весовые коэффициенты, характеризующие значимость частот каждого из диапазонов.

$P(\omega_0)$ – мощность основной гармоники, Вт;

2.7.3 По анализу динамического коэффициента мощности и энергоресурса

В качестве критерия для оценки энергетических процессов в реальном электрическом двигателе, обладающим неравномерным полем в воздушном зазоре и, как следствие, имеющим полигармонический состав спектра токов и напряжений, применим понятие динамического коэффициента мощности [81, 103, 329, 340], равного (2.7.31).

$$K_{\text{ЭП}} = \eta \cdot K_M \cdot K_H, \quad (2.7.31)$$

где η – коэффициент полезного действия электрической машины;

K_M – средний коэффициент мощности;

K_H – коэффициент искажений.

Для полигармонического сигнала мощности многофазной машины КПД определяется как (2.7.32).

$$\eta = \frac{P_2}{\sum_{k=1}^m \sum_{n=0}^{\infty} P_{nk}}, \quad (2.7.32)$$

где P_2 – механическая мощность на валу двигателя, кВт;

m – число фаз двигателя;

P_{nk} – мощность n -ной гармоники k -ой фазы двигателя, кВт.

В случае непрерывного преобразования Фурье сигнала [212], с учетом того, что наблюдаемый диапазон спектра ограничивается быстродействием реального

измерительного тракта и не может превышать его максимальной частоты ω_{\max} , можно записать (2.7.33).

$$\eta = \frac{P_2}{\sum_{k=1}^m \int_0^{\omega_{\max}} P_k(\omega) d\omega}, \quad (2.7.33)$$

где $P_k(\omega)$ – составляющая мгновенной мощности, приходящаяся на частоту ω .

Средний коэффициент мощности [72] определяется (2.7.34).

$$K_M = \frac{\sum_{k=1}^m \sum_{n=0}^{\infty} P_{nk}}{\sum_{k=1}^m \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} U_{nk}^2} \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_{nk}^2}}, \quad (2.7.34)$$

где U_{nk} – напряжение n -ной гармоники k -ой фазы двигателя, В,

I_{nk} – ток n -ной гармоники k -й фазы двигателя, А.

Учитывая ограничения быстродействия при измерениях при непрерывном преобразовании Фурье, запишем (2.7.35).

$$K_M = \frac{\sum_{k=1}^m \int_0^{\omega_{\max}} P_k(\omega) d\omega}{\sum_{k=1}^m \sqrt{\int_0^{\omega_{\max}} U_k^2 d\omega} \sqrt{\int_0^{\omega_{\max}} I_k^2 d\omega}}. \quad (2.7.35)$$

Коэффициент искажений характеризует отношение полезной мощности машины при реальном поле в зазоре к полезной мощности при синусоидальном поле в зазоре (для идеальной машины).

Учитывая, что при синусоидальном поле сигнал содержит только основную гармонику, для коэффициента искажений мощности можно записать (2.7.36).

$$K_{\text{И}} = \frac{P_{20}}{P_{2\text{несин}}} = \frac{\eta_{\text{ном}} P_{2\text{ном}}}{\eta \sum_{k=1}^m \int_0^{\omega_{\max}} P_k(\omega) d\omega}, \quad (2.7.36)$$

где P_{20} – мощность основной гармоники поля, Вт;

$P_{2\text{ном}}$ – мощность на валу в номинальном режиме;

$P_{2\text{несин}}$ – суммарная мощность искажений, создаваемых высшими гармониками, включая основную, Вт;

$\eta_{\text{ном}}$ – номинальный коэффициент полезного действия электрической машины.

Следует отметить, что понятие динамического коэффициента мощности характеризует общее состояние диагностируемого ЭМО, т.к. позволяет оценить соотношение мощности спектра сигнала к полезной мощности и соответствующее им влияние искажений на энергетические показатели.

Технический ресурс T_p определяет интервал времени, в течение которого, с заданной вероятностью, ЭМО не перейдет в предельное состояние. Учитывая зависимость остаточного ресурса от роста потерь, обусловленных искажениями питающей сети и наличием дефектов в ЭМО, следует рассмотреть обобщенный индикатор, учитывающий влияние данных факторов на срок службы.

Энергоресурс J , определяемый приведенной величиной потерь в агрегате за время до перехода его в предельное состояние и номинальный энергоресурс (2.7.37) – (2.7.38).

$$J = \rho T_p \quad (2.7.37)$$

$$J_{\text{ном}} = \rho_{\text{ном}} T_{p,\text{ном}} \quad (2.7.38)$$

В работах [58, 90, 102] приведены теоретические и экспериментальные зависимости потерь энергии и коэффициента полезного действия приводов горных машин в функции потребляемой электрической мощности, тока, а также параметров, характеризующих режимы работы горной машины, в частности, от скорости подачи, в основном зависимости нелинейны, поэтому необходимо использовать перегрузочный коэффициент $K_{\text{пер}}$, характеризующий приращение потерь при перегрузке. Значение энергоресурса определяется (2.7.39).

$$J_0 = \sum_{i=1}^N K_{\text{пер}i} \cdot \rho_i \Delta t_i, \quad (2.7.39)$$

где ρ_i – приведенные потери при i -ом замере определяемые по эксплуатационным характеристикам;

Δt_i – время между замерами, ч;

$K_{\text{пер}i}$ – перегрузочный коэффициент при i -ом замере.

Тогда, (2.7.38) примет вид (2.7.40).

$$T_{p,\text{ост}} = \left(1 - \frac{J_0}{J_{\text{ном}}}\right) T_{\text{ном}}. \quad (2.7.40)$$

С учётом полигармонического состава электрической мощности (2.7.41).

$$\rho_i = \sum_{k=1}^M \rho_{ik}(\omega_k), \quad (2.7.41)$$

где $\rho_{ik}(\omega_k)$ – k -ая гармоническая составляющая в спектре потерь;

M – число анализируемых гармоник спектра.

Для учёта разного влияния гармоник на энергоресурс введем весовые коэффициенты (2.7.42).

$$\rho_i = \sum_{k=1}^M K_{\text{вг}k} \rho_{ik}(\omega_k), \quad (2.7.42)$$

где $K_{\text{вг}k}$ – весовые коэффициенты, учитывающие значимость k -й гармоники спектра.

Энергоресурс (2.7.39) представим как (2.7.43).

$$J = \sum_{i=1}^N K_{\text{пер}i} [\sum_{k=1}^M K_{\text{вг}k}(\omega_k) \rho(\omega_k)] \Delta t_i. \quad (2.7.43)$$

Подставляя выражение (2.7.43) в (2.7.40), получим (2.7.44).

$$T_{\text{р.ост}} = \left(1 - \frac{J_0}{J_{\text{ном}}}\right) T_{\text{р.ном}} \sum_{i=1}^N K_{\text{пер}i} [\sum_{k=1}^M K_{\text{вг}k}(\omega_k) \rho(\omega_k)] \Delta t_i. \quad (2.7.44)$$

При периодическом определении ресурсного параметра, достижение которым своего предельного значения приводит к отказу объекта, задача оценки и прогнозирования остаточного ресурса решается известными методами [90].

2.8 По анализу электромагнитного момента

Если момент нагрузки зависит от положения ротора, ток будет содержать спектральные компоненты, совпадающие с неисправностью. В идеальной машине, где потокосцепление статора чисто синусоидальное, любые колебания в крутящем моменте нагрузки при кратности скорости вращения будут производить токи статора на частотах (2.8.1).

$$f_{\text{load}} = f_s \pm m f_r = f_s \left[1 \pm m \left(\frac{1-s}{p}\right)\right], \quad (2.8.1)$$

где $m = 1, 2, 3 \dots$

Поскольку такие же одинаковые частоты проявляются при эксцентриситете и сломанных стержнях ротора, становится ясно, что, когда асинхронная машина работает с типичной изменяющейся во времени нагрузкой, колебания крутящего момента приводят к возникновению токов статора, которые могут накладываться и часто преобладать над токами, обусловленными неисправностями. Следовательно, любая схема обнаружения неисправностей на основе спектра тока статора должна основываться на контроле тех спектральных составляющих, на которые не влияют колебания крутящего момента нагрузки.

Наличие дефектов приводит к колебаниям электромагнитного момента ЭМО, который для АД определяется из уравнения (2.8.2).

$$M_e = \frac{3}{2} z_p \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot I_{st} \psi_r \sin(\theta), \quad (2.8.2)$$

где L_m – индуктивность намагничивания, Гн;

z_p – количество пар полюсов асинхронного двигателя;

ψ_r – потокосцепление ротора, Вб;

L_r – индуктивность обмотки ротора, Гн;

θ – угол между векторами тока статора I_{st} и потокосцеплением ротора ψ_r , рад.

В случае питания АД от АИН постоянный электромагнитный момент образуется при взаимодействии гармоник тока статора и потокосцепления ротора одного порядка, кратных основной частоте. При этом электромагнитный момент (2.8.3).

$$M_e = M_{(n)} + M_{(qp)} = \sum_{n=1}^{n=\infty} I_{st(n)} \psi_{r(n)} \sin(\theta) + \sum_{q=1}^{q=\infty} \sum_{p=1}^{p=\infty} I_{st(q)} \psi_{r(p)} \sin(\theta_{qp}), \quad (2.8.3)$$

где $I_{st(n)}$, $I_{st(q)}$, $\psi_{r(n)}$, $\psi_{r(p)}$ – гармонические составляющие тока статора и потокосцепления ротора А, Вб;

$M_{(n)}$, $M_{(qp)}$ – составляющие электромагнитного момента Н·м, создаваемые в результате взаимодействия n -ми гармониками тока статора и потокосцепления ротора, q -ой гармоники тока статора и p -ой гармоники потокосцепления ротора;

θ_{qp} – угол между q -ой гармоникой тока статора и p -ой гармоникой потокосцепления ротора, рад.

Формирование пульсации результирующего электромагнитного момента происходит при взаимодействии постоянного $M_{(n)}$ и знакопеременного $M_{(qp)}$ моментов, амплитуда и частота которых определяется системой управления.

Расчёт коэффициента пульсации электромагнитного момента (2.8.4).

$$K_{Me} = \sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} M_{(n)}^2} / M_{av}, \quad (2.8.4)$$

где M_{av} – среднее значение электромагнитного момента, Н·м;

K_{Me} – определяемый типом и структурой силового преобразователя частоты коэффициент пульсаций электромагнитного момента, о.е.

Результирующий электромагнитный момент (2.8.2) можно (2.8.3) представить в виде (2.8.5).

$$M_e = M_{(n)} + M_{(qp)} + M_{(di)} = \sum_{n=1}^{n=\infty} I_{st(n)} \psi_{r(n)} \sin(\theta) + \\ + \sum_{q=1}^{q=\infty} \sum_{p=1}^{p=\infty} I_{st(q)} \psi_{r(p)} \sin(\theta_{qp}) + \sum_{i=1}^{i=\infty} I_{st(di)} \psi_{r(di)} \sin(\theta_{di}), \quad (2.8.5)$$

где $I_{st(di)}$, $\psi_{r(di)}$ – гармонические составляющие тока статора и потокосцепления ротора А, Вб;

$M_{(di)}$ – составляющие электромагнитного момента, создаваемые в результате взаимодействия n -ми гармониками тока статора и потокосцепления ротора, di -ми гармониками тока статора и потокосцепления ротора, q -ой гармоники тока статора и p -ой гармоники потокосцепления ротора, Н·м;

θ_{di} – угол между di -ми гармониками тока статора и потокосцепления ротора, рад.

Суммарный коэффициент пульсации электромагнитного момента с учетом (2.8.4) и (2.8.5) примет вид (2.8.6).

$$\Sigma K_{Me} = \sqrt{(\sum_{n=2}^{n=\infty} M_{(n)}^2 + \sum_{q=1}^{q=\infty} \sum_{p=1}^{p=\infty} M_{(qp)}^2)} / M_{av} + \sqrt{\sum_{i=2}^{i=\infty} M_{(di)}^2} / M_{av} = K_{Me(n)} + K_{Me}^*, \quad (2.8.6)$$

где $K_{Me(n)}$ – коэффициент пульсаций электромагнитного момента, определяемый типом и структурой силового преобразователя частоты, о.е.;

M_{av} – среднее значение электромагнитного момента асинхронного двигателя, Н·м;

K_{Me}^* – коэффициент пульсаций электромагнитного момента, определяемый наличием и уровнем дефекта АД и ИМ электропривода, о.е.

Анализ изменения коэффициента пульсаций показал, что при пуске он достигает 20 %, при этом двухуровневый инвертор напряжения с 6-ти импульсной схемой с замкнутой скалярной системой управления по частоте вращения ротора с ШИМ обеспечивает $K_{Me}=2-5\%$, в свою очередь векторная система управления с пространственно-векторной ШИМ обеспечивает $K_{Me}= 7-10\%$. В таблице 2.8.1 представлен анализ K_{Me} при вариации конфигурации систем управления и видов неисправностей.

Появление неисправностей в элементах и в узлах приводных механизмов, а также отклонение технологических параметров от номинальных оказывают влияние как на технологический процесс, так и на работу электропривода механизма.

Таблица 2.8.1 – Влияние величины дефекта на суммарный коэффициент пульсаций

СУ	Вид дефекта	ΣK_{Me} при величине дефекта, %					
		0	5	10	15	20	25
по скорости ВСУ	МЗ	8,2	8,6	9,3	14,3	30,2	35,4
	СР		10	12,5	15,1	18,7	20,4
	ИП		9,1	11,1	13,4	14,8	15,6
	КЭ		9,2	11,3	12,8	13,1	14,7
по скорости ССУ	МЗ	5,0	5,6	6,3	11,3	27,2	32,4
	СР		7	9,5	12,1	15,7	17,4
	ИП		6,1	8,1	10,4	11,8	12,6
	КЭ		6,2	8,3	9,8	10,1	11,7

Примечание: КЭ – комбинированный эксцентриситет; МЗ – межвитковые замыкания обмотки статора; ИП – износ подшипников; СР – обрыв стержней ротора.

На примере механизма вращения барабанной мельницы появление подобных факторов приводит к отклонению эталонного состояния процесса измельчения и, как следствие, приводит к увеличению удельной суммарной мощности для всех столкновений частиц руды в барабане мельницы относительно эталонного состояния (Рисунок 2.8.1). Особенности конструкции лифтеров влияют на поведение загрузки внутри мельницы. Если управление динамикой внутримельничной загрузкой не осуществляется, то большая часть энергии расходуется не на измельчение руды, а на разрушение измельчающих тел и повреждение футеровки и других механических частей мельницы [41]. Загрузка мельницы или уровень заполнения является главным параметром, так как он определяет технологическую устойчивость процесса измельчения. Неправильная идентификация данного параметра может привести не только к снижению производительности (при его пониженном значении), но и к нарушению работы технологической системы, повреждению узлов мельницы (при его повышенном значении).

При диагностике конструкторских узлов мельницы идентифицируется динамическое состояние мельницы. В соответствии с полученными данными

можно охарактеризовать состояние износа футеровки мельницы и ее лифтеров. Развитие износа футеровки с течением времени приводит к большему значению удельной суммарной мощности, что требует оптимизации энергетических затрат за счет формирования нового задания на частоту вращения электродвигателя мельницы. Главной трудностью при изучении поведения загрузки является невозможность установить измерительные устройства внутри корпуса мельницы. В таком случае реализуются только методы косвенного мониторинга.

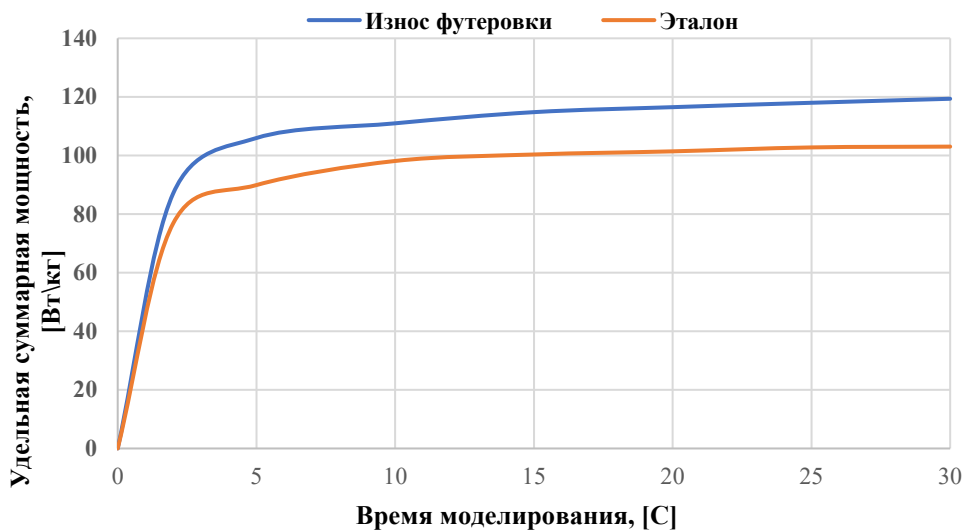


Рисунок 2.8.1 – Зависимость удельной суммарной мощности от времени моделирования процесса измельчения при износе футеровки и при эталонном состоянии

Под эталонным состоянием принимается процесс измельчения в барабанной мельнице, при котором нет износа футеровки барабана мельницы и мелящих тел при неизменных физико-механических свойств руды.

Влияние таких факторов, как износ футеровки, износ мелющих тел и изменение физико-механических свойств руды возможно отследить только с помощью цифрового моделирования процесса измельчения.

Создание цифровой модели приводного механизма на примере мельницы

Алгоритмы DEM-моделирования строятся на вычислении [298] нормальной и тангенциальной составляющих сил взаимодействия пар: частица-частица и частица-граница объекта симуляции.

В соответствии с линейной упругой моделью гистерезиса [309], нормальная составляющая силы взаимодействия к плоскости контакта вычисляется следующим образом (2.8.7) – (2.8.8).

$$F_n^t = \begin{cases} \min(K_{nl}s_n^t, F_n^{t-\Delta t} + K_{nu}\Delta s_n), & \Delta s_n \geq 0, \\ \max(F_n^{t-\Delta t} + K_{nu}\Delta s_n, \lambda K_{nl}s_n^t), & \Delta s_n < 0, \end{cases} \quad (2.8.7)$$

$$\Delta s_n = s_n^t - s_n^{t-\Delta t}. \quad (2.8.8)$$

где K_{nl} и K_{nu} – значения нагрузочной и разгрузочной контактных жесткости;
 F_n^t и $F_n^{t-\Delta t}$ – нормальные упругопластические контактные силы в текущий момент времени t и в предыдущий момент времени $t - \Delta t$;

Δt – шаг моделирования;

Δs_n – изменение нормального перекрытия контактов частиц в течение текущего времени (положительное, когда частицы приближаются друг к другу, и отрицательное, когда отдаляются);

s_n^t и $s_n^{t-\Delta t}$ – значения нормального перекрытия в текущий и предыдущий момент времени;

λ – константа, $\lambda = 0,001$.

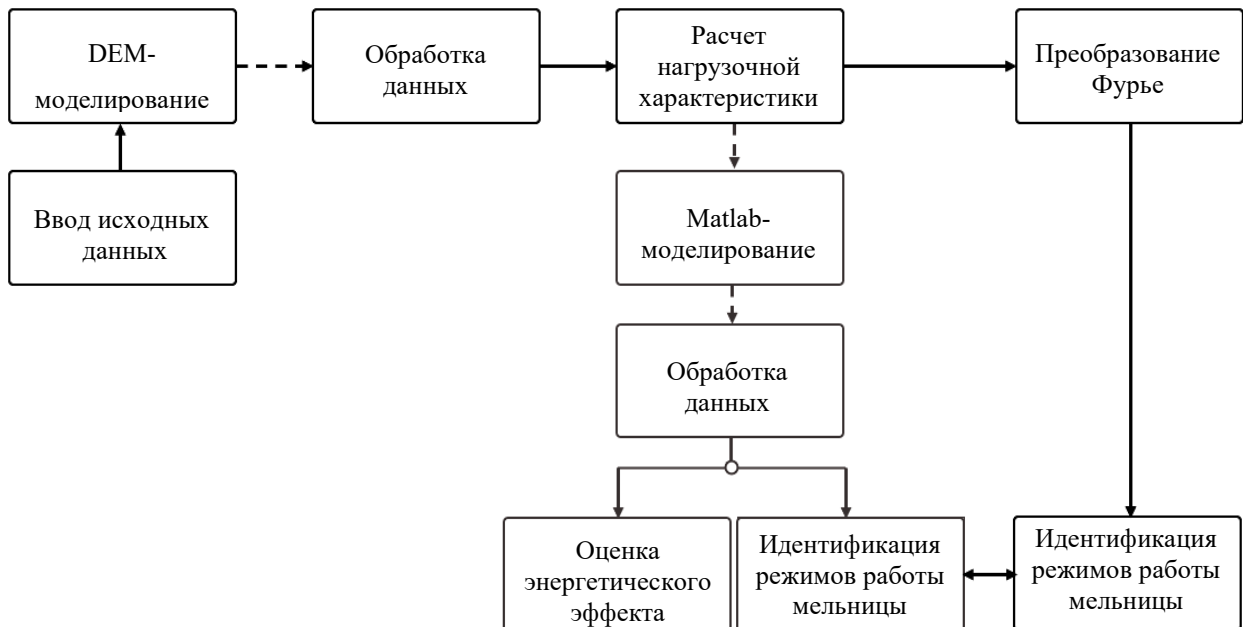


Рисунок 2.8.2 – Метод формирования эталонных спектров предельного состояния приводного механизма

Упругофрикционная тангенциальная составляющая вычисляется по предельной упругой модели Кулона (*Linear spring Coulomb limit model*) [315] как (2.8.9) – (2.8.10).

$$F_{\tau,e}^t = F_{\tau}^{t-\Delta t} - K_{\tau}\Delta s_{\tau}, \quad (2.8.9)$$

$$F_{\tau}^t = \min(|F_{\tau,e}^t|, \mu F_n^t) \frac{F_{\tau,e}^t}{|F_{\tau,e}^t|}, \quad (2.8.10)$$

где $F_n^{t-\Delta t}$ – значение тангенциальной силы в предыдущий момент времени;

Δs_{τ} – тангенциальное относительное смещение частиц в течение временного интервала;

K_{τ} – тангенциальная жесткость;

μ – коэффициент трения.

Так как моделируемые частицы, находящиеся внутри мельницы, имеют сферическую форму, используется модель сопротивления частиц качению. В соответствии с моделью [196] «Тип С: предел качения линейной пружины» описан выражениями (2.8.11) – (2.8.12).

$$M_r^t = \min(|M_{r,e}^t|, M_{r,\text{lim}}) \frac{M_{r,e}^t}{|M_{r,e}^t|}, \quad (2.8.11)$$

$$M_{r,e}^t = M_r^{t-\Delta t} - K_r \omega_{\text{rel}} \Delta t, \quad (2.8.12)$$

где M_r^t – вектор момента сопротивления качению;

$M_{r,\text{lim}}$ – предельное значение момента сопротивления качению;

$M_r^{t-\Delta t}$ – вектор момента сопротивления качению в предыдущий момент времени;

K_r – жесткость качения;

ω_{rel} – вектор относительной угловой скорости.

Для сокращения времени моделирования процесса расчет или вычисление проводились для участка барабанной мельницы длиной 0,9 м. В данной статье осуществлялось моделирование мельницы полусамоизмельчения. В модели принято допущение, что все частицы, взаимодействующие внутри мельницы, являются сферическими. Такое решение позволяет упростить проведение расчетов и сократить время моделирования, однако не позволяет учесть геометрию реальных измельчаемых частиц. Изменение геометрии частиц не рассматривается как фактор, оказывающий влияние на поведение нагрузочной характеристики для последующего моделирования электропривода. Однако нельзя отрицать факт влияния геометрии измельчаемых частиц на изменение поведения внутримельничной загрузки, скорости и момента [192].

Геометрические и технологические параметры мельницы, заданные при моделировании: внешний диаметр мельницы 11,5 м; длина участка 0,9 м; номинальная масса руды $m_{p1} = 30$ т; номинальная масса измельчающих тел $m_t = 8$ т; плотность руды 2800 кг/м³; плотность измельчающих тел 7800 кг/м³.

Длительность моделирования составляла 35 с с шагом моделирования 0,0005 с. Скорости вращения барабана выбраны в соответствии с рекомендованными режимными значениями при проектировании обогатительных фабрик. Как правило, диапазон регулирования находится в пределах 0,5-0,85 от критической скорости $n_{кр}$.

Процесс измельчения протекает под воздействием трех основных механизмов разрушения: удар, истирание и абразивный износ. Влияние данных механизмов будет различным в зависимости от режима работы мельницы. Режим работы определяется скоростью мельницы. Согласно [115] можно выделить семь скоростных режимов работы. Принято выражать режим работы относительно критической частоты вращения. При превышении значения критической скорости частицы начинают центрифугировать и прилипать к барабану под действием центробежных сил [226] в соответствии с (2.8.13).

$$n_{кр} = \frac{42,3}{\sqrt{D}}. \quad (2.8.13)$$

Данный режим работы недопустим, воздействия разрушающих сил не происходит – измельчение руды не осуществляется. Можно выделить три основных режима работы мельницы:

- каскадный (частота вращения барабана 50-60 % от критической скорости);
- водопадный (частота вращения барабана 70-85 % от критической скорости);
- смешанный (промежуточный между каскадным и водопадным с частотой вращения барабана 60-70 % от критической скорости).

При пониженных значениях скорости частицы перекатываются из одной части барабана в другую, разрушение происходит под действием истирания и

абразивного износа. С увеличением скорости вращения мельницы верхние слои частиц отрываются от других, поднимаются и в верхней точке траектории падают под действием сил тяжести. Разрушение данных слоев происходит под действием удара. На практике удар используется для разрушения крупных крепких частиц, а истирание – для сокращения размера материала менее крепких пород для получения заданного класса крупности при последующих стадиях обогащения.

Выбраны характерные значения скорости, соответствующие трем рассматриваемым режимам работы мельниц: n_1 – каскадный – 65 % от $n_{кр} = 0,84$ рад/с (8 об/мин); n_2 – водопадный – 80 % от $n_{кр} = 1,05$ рад/с (10 об/мин); n_3 – критический – 100 % от $n_{кр} = 1,31$ рад/с (12,5 об/мин).

При проведении исследований учитывался фактор изменения загрузки мельницы. В модели мельницы задавалось три насыпи исходного сырья: $m_{p1} = 25$ т, $m_{p2} = 35$ т и $m_{p3} = 40$ т. Для каждой насыпи осуществлялось измельчение при трех скоростях n_1 , n_2 и n_3 .

Извлечение полезного компонента осуществляется из пульпы (при обогащении методами флотации или «уголь в пульпе»), поэтому кроме руды в мельницу загружается и вода. Добавление воды оказывает существенное влияние на получение необходимого готового продукта – 0,074 мм, поэтому ее наличие в барабане мельницы необходимо учитывать [129, 257]. Учет добавления воды не производился, так как ее наличие подразумевает проведение дополнительного CFD-моделирования, а исследование ориентировано на реализацию электромеханической системы процесса измельчения.

После каждого эксперимента данные экспортировались осуществлялся расчет модуля эквивалентного момента по трем проекциям x , y и z в соответствии с данными *Rocky DEM* (2.8.14).

$$M = \sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2}. \quad (2.8.14)$$

Полученный момент использовался в качестве нагрузочной характеристики для модели электропривода в Matlab Simulink на втором этапе проведения исследований.

После проведения операции быстрого преобразования Фурье получены спектры модулей эквивалентных моментов, по которым произведена идентификация режимов работы мельницы. Таким образом, получена матрица состояний барабанной мельницы по спектральным составляющим нагрузочного момента.

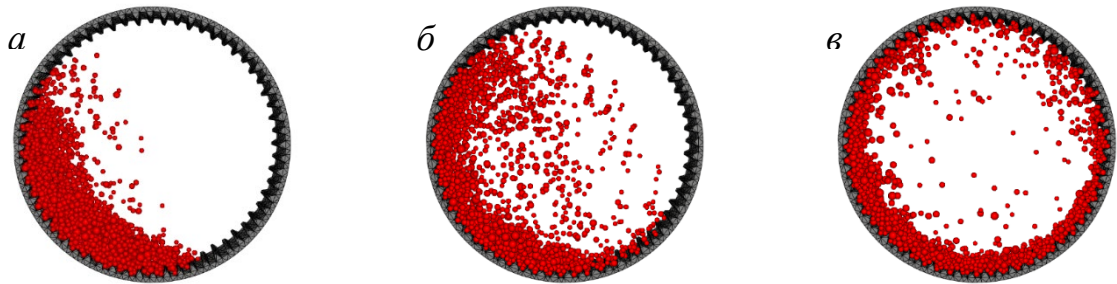


Рисунок 2.8.3 – Режимы работы мельницы: а – каскадный; б – водопадный; в – критический

С помощью программного обеспечения *Rocky DEM* выполнено цифровое моделирование четырех экспериментов процесса измельчения: 1 – процесс измельчения при эталонном состоянии; 2 – процесс измельчения при износе футеровки; 3 – процесс измельчения при износе мелющих тел; 4 – процесс измельчения при изменении физико-механических свойств руды.

Для сокращения времени моделирования был взят промежуток времени, соответствующий выходу мельницы в установившийся режим работы мельницы. Такой режим считается достигнутым, если средние координаты всех частиц по вертикальной и горизонтальной осям приходят к условно неизменным значениям [337]. Установившийся режим работы достигается в момент времени 16 с. Таким образом, выбран интервал нагрузки, соответствующий 2 с времени нагрузочной характеристике при загрузке 35 т и скорости 1,05 рад/с от 16 до 18 с.

В результате получены соответствующие нагрузочные характеристики моментов (Рисунок 2.8.4).

Сигналы нагрузочных моментов характеризуются высокой динамикой, без применения элементов математической статистики сложно обнаружить различия. Каждый сигнал оценен с помощью инструментов математической статистики: среднее значение, медиана, дисперсия, асимметрия, стандартное отклонение, эксцесс (Таблица 2.8.2).

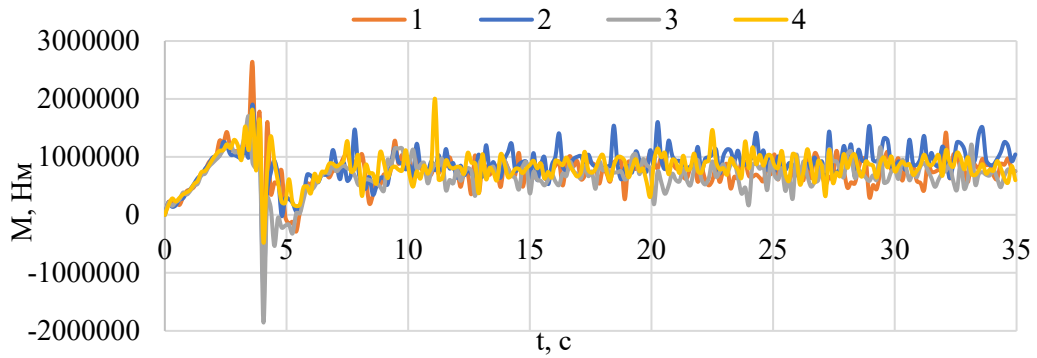


Рисунок 2.8.4 – Нагрузочные характеристики механизма вращения барабанной мельницы при эталонном состоянии (1), при износе футеровки (2), при износе мелющих тел (3), при изменении физико-механических свойств руды (4)

Таблица 2.8.2 – Характеристики нагрузочных моментов механизма вращения мельницы

Среднее значение	Медиана	Дисперсия	Асимметрия	Стандартное отклонение	Экссесс
749803,5	779460,2	102715000000	-0,2	320492,6	10,1
861337,9	867059,3	99755214254	-1,4	315840,5	8,8
676261,3	710092	108026000000	-2,4	328673,3	15,5
812115,5	812651,4	74751704540	-0,1	273407,6	4,2

Согласно данным (Таблица 2.8.2) изменение состояния мельницы приводит к изменению нагрузочных моментов. Однако, таких данных недостаточно, чтобы сделать вывод, в том числе, о влиянии изменения состояния мельницы на формирование электромагнитного момента. Для того, чтобы сделать вывод о влиянии рассматриваемых состояний мельницы на потребление удельной мощности, разработана имитационная модель электропривода. В качестве нагрузочных характеристик приняты сигналы состояния мельницы (Рисунок 2.8.4). Далее, сигналы электромагнитного момента разложены в спектры.

Состояние при износе футеровки барабана мельницы. Данное состояние характеризуется широким размахом в амплитудах частотных составляющих, формированием локальных максимумов и более низким пороговым значением амплитуд в спектре момента на частотах выше 200 Гц до 1000 Гц относительно эталонного состояния (Рисунок 2.8.5 а, б).

Состояние при износе мелющих тел. Данное состояние характеризуется маленьким размахом в амплитудах частотных составляющих и более высоким

пороговым значением амплитуд в спектре момента на частотах выше 200 Гц до 1000 Гц относительно эталонного состояния (Рисунок 2.8.5 а, в).

Состояние при изменении физико-механических свойств руды. Данное состояние характеризуется отсутствием размаха в амплитудах частотных составляющих и высоким пороговым значением амплитуд в спектре момента на частотах выше 200 Гц до 1000 Гц относительно эталонного состояния (Рисунок 2.8.5 а, г).

В спектре электромагнитного момента отражается природа разрушения руды. Таким образом, в спектре электромагнитного сигнала момента электропривода можно выделить не только неисправности со стороны элементов и узлов электропривода, но и оценить состояние приводных механизмов.

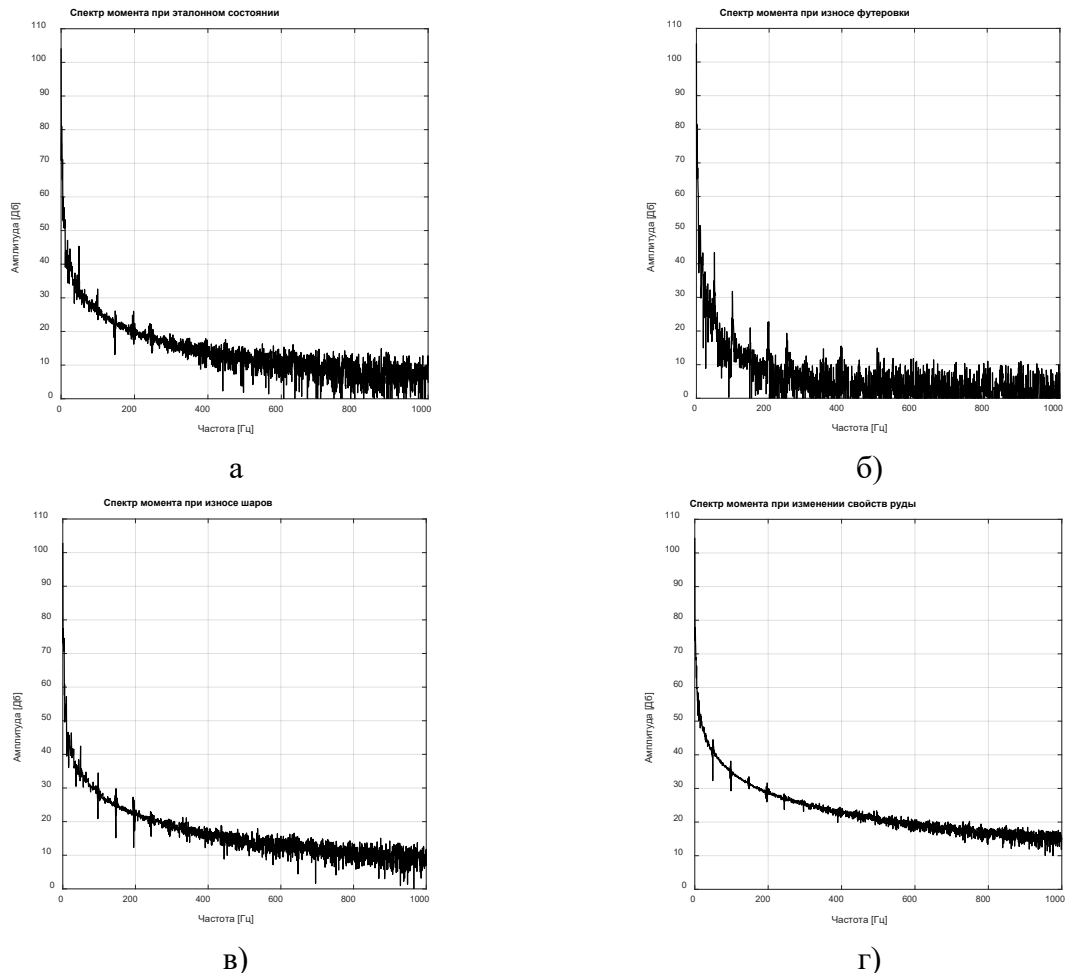


Рисунок 2.8.5 – Спектры электромагнитного момента при разных состояниях мельницы: а – при эталонном состоянии; б) – при износе футеровки; в) – при износе шаров; г) – при изменении свойств руды

2.9 Комплексная диагностика электромеханического оборудования по электрическим сигналам

Большинство методов распознавания состояния основывается на предположение, что изображения объектов одного класса более близки друг другу, чем изображения парных классов. Поэтому для оценки остаточного ресурса ЭМО используем метрические методы, основанные на количественной оценке этой близости. В качестве оценки остаточного ресурса ЭМО принимается точка в пространстве признаков a , мерой близости считается расстояние между точками.

В пространстве признаков ЭМО характеризуется N – мерным вектором (2.9.1).

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_N). \quad (2.9.1)$$

На основании проведенных исследований установлено, что остаточного ресурс определяется на основе комплекса диагностических признаков, рассмотренных в данной главе, следовательно (2.9.2).

$$x_{\text{ЭМО}} = (K_{I_A}, K_{I_B}, K_{I_C}, K_{\text{ЭП}}, K_{\text{ГI}}, K_{\text{ГP}}, K_{P_A}, K_{P_B}, K_{P_C}, K_{\text{несимU}}, K_{\text{несимI}}, K_{\text{несимP}}, K_{\Delta P}, K_{U_A}, K_{U_B}, K_{U_C}), \quad (2.9.2)$$

где $K_{\text{ЭП}}$ – динамический коэффициент мощности;

$K_{I_A}, K_{I_B}, K_{I_C}$ – отличие амплитуд тока на частотах соответствующих дефектов от уровня основной частоты для фаз A, B, C соответственно;

$K_{\text{Г}}$ – коэффициент гармоник (тока и мощности);

$K_{U_A}, K_{U_B}, K_{U_C}$ – отличие амплитуд напряжения на частотах соответствующих дефектов от уровня основной частоты сети для фаз A, B, C соответственно;

$K_{\text{несимI}}$ – коэффициент несимметрии тока;

$K_{\text{несимU}}$ – коэффициент несимметрии напряжения;

$K_{P_A}, K_{P_B}, K_{P_C}$ – отличие амплитуд сигналов мощности на частотах соответствующих дефектов от уровня основной частоты для фаз A, B, C соответственно;

$K_{\text{несимP}}$ – коэффициент несимметрии мощности;

$K_{\Delta P}$ – коэффициент потери мощности.

В диагностическом пространстве ЭМО описывается вектором, размерность которого отличается от размерности вектора в пространстве признаков. В качестве координат диагностического пространства принимается функция остаточного ресурса (2.9.3)

$$\delta_i = \varphi_j(x_{ЭМО}) \quad . \quad (2.9.3)$$

На основе метрических методов пространство признаков переносится на диагностическое пространство. При использовании квадратичного расстояния (2.9.4).

$$\delta_i^2 = \sum_{j=1}^N k_{ij}^2 x_{ij}^2 \quad (2.9.4)$$

где k_i – определяемый на основе статистических данных весовой коэффициент.

Таким образом можем записать выражение для остаточного ресурса (2.9.5).

$$\begin{aligned} \delta^2 = & k_1^2 K_{IA}^2 + k_2^2 K_{IB}^2 + k_3^2 K_{IC}^2 + k_4^2 K_{ЭП}^2 + k_5^2 K_{Г1}^2 + k_6^2 K_{ГР}^2 + k_7^2 K_{РА}^2 + k_8^2 K_{РВ}^2 + \\ & k_9^2 K_{РС}^2 + k_{10}^2 K_{НЕСИМУ}^2 + k_{11}^2 K_{НЕСИМИ}^2 + k_{12}^2 K_{НЕСИМП}^2 + k_{13}^2 K_{ДР}^2 + k_{14}^2 K_{УА}^2 + \\ & k_{15}^2 K_{УВ}^2 + k_{16}^2 K_{УС}^2 \end{aligned} \quad (2.9.5)$$

Для интеграции данных при определении остаточного ресурса, в первую очередь, по результатам эксплуатации или испытаний устанавливается связь между предельными значениями ресурса и диагностических параметров [82]. Затем, по полученным данным находим наиболее адекватные аппроксимирующие модели изменения ресурсного и диагностических параметров, которые используется для для вычисления коэффициентов a_{ij} системы дифференциальных уравнений (2.9.6).

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3, \\ \frac{dx}{dt} &= a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3, \\ \frac{dx}{dt} &= a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3, \end{aligned} \quad (2.9.6)$$

где $a_{ij} = (i, j = 1, 2, 3 \dots)$ – постоянные коэффициенты. Неизвестные коэффициенты a_{ij} находятся из минимизации соответствующих квадратичных форм.

Интегрируя систему обыкновенных дифференциальных уравнений (2.9.6), получим предельные значения x_{1lim} , x_{2lim} для диагностических параметров при условии, что ресурсный параметр достигает своего заданного предельного значения x_{3lim} . На основании установленных предельных значения диагностических параметров (x_{1lim} , x_{2lim}), по измерению диагностических параметров (x_1 , x_2) определяем остаточный ресурс.

По результатам определения диагностических параметров формируем систему динамических уравнений (2.9.7).

$$\frac{dx_1}{dt} = b_{11}x_1 + b_{12}x_2; \frac{dx_2}{dt} = b_{21}x_1 + b_{22}x_2. \quad (2.9.7)$$

Интегрируя систему (2.9.7), определяем прогнозируемый остаточный ресурс, при котором хотя бы один из диагностических параметров достигает своего предельного значения. По результатам интегрирования (2.9.7) определяем значения наработок t_{x1lim} и t_{x2im} , при которых диагностические параметры достигают свои предельные значения. Для оценки среднего значения остаточного ресурса принимаем минимальное значение (2.9.8).

$$T_{\text{оcр}} = \min\{(t_{x1lim} - t_{\text{изм}}); (t_{x2im} - t_{\text{изм}})\}, \quad (2.9.8)$$

где $t_{\text{изм}}$ – наработка, соответствующая последнему измерению диагностических параметров.

По статистическим данным вычислим коэффициенты вариации ресурсного и диагностических параметров (2.9.9).

$$v_j = \frac{\sqrt{n}}{\sum_{i=1}^n \Delta x_{ji}} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\Delta x_{ji} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_{ji} \right)^2}, \quad (2.9.9)$$

где $\Delta x_{ji} = x_{ji+1} - x_{ji}$, индекс j соответствует номеру контролируемого параметра ($j = 1, 2, 3 \dots$), а индекс i соответствует моменту времени (наработки) t_i ($j = 1, 2, 3, \dots, n$).

Если установлено, что изменение ресурсного параметра имеет монотонный характер, в качестве теоретической модели распределения остаточного ресурса принимают DM -распределение (2.9.10).

$$F(\tau) = DM(\tau, \mu, \nu) = \Phi\left(\frac{\tau - \mu}{\nu\sqrt{\mu\tau}}\right), \quad (2.9.10)$$

где $\Phi\left(\frac{\tau-\mu}{v\sqrt{\mu\tau}}\right)$ – функция нормированного нормального распределения;

μ – параметр масштаба распределения;

τ – наработка на отказ.

При немонотонном характере принимаем DN -распределение (2.9.11).

$$F(\tau) = DN(\tau, \mu, \nu) = \Phi\left(\frac{\tau-\mu}{v\sqrt{\mu\tau}}\right) + \exp(2\nu^{-2})\Phi\left(-\frac{\tau+\mu}{v\sqrt{\mu\tau}}\right). \quad (2.9.11)$$

Оценку коэффициента вариации ν распределений (2.9.10) и (2.9.11) определяют используя формулу (2.9.9).

Для оценки параметра масштаба μ распределений (2.9.10) и (2.9.11) получим (2.9.12).

$$\mu = \begin{cases} T_{\text{оср}}/(1 + \nu^2/2), & \text{если принято } DM \text{ – распределение;} \\ T_{\text{оср}}, & \text{если принято } DN \text{ – распределение.} \end{cases}, \quad (2.9.12)$$

Гамма-процентный остаточный ресурс (2.9.13).

$$T_{o\gamma} = \begin{cases} \mu\left(1 + \frac{\nu^2 U_{\gamma}^2}{2} - \nu U_{\gamma} \sqrt{1 + \frac{\nu^2 U_{\gamma}^2}{4}}\right), & \text{если принято } DM \text{ – распределение;} \\ \mu x(1 - \gamma; \nu), & \text{если принято } DN \text{ – распределение.} \end{cases} \quad (2.9.13)$$

Относительную наработку $x(1 - \gamma; \nu) = \tau/\mu$ вычисляют по вероятности отказа $F = 1 - \gamma$ и коэффициента вариации ν из таблиц DM -распределения или решая уравнение (2.9.14).

$$\gamma = \Phi\left(\frac{1-x}{v\sqrt{x}}\right) - \lambda^{2\nu^{-2}}\Phi\left(-\frac{1+x}{v\sqrt{x}}\right). \quad (2.9.14)$$

Вероятность безотказной работы за наработку $\tau_{\text{зад}} \Phi_{\text{зад}}$ после момента $t_{\text{изм}}$ (2.9.15).

$$P(\Phi_{\text{зад}}) = \begin{cases} \Phi\left(\frac{M-\Phi_{\text{зад}}}{N\sqrt{M\Phi_{\text{зад}}}}\right), & \text{если принято } DM \text{ – распределение;} \\ \Phi\left(\frac{M-\Phi_{\text{зад}}}{N\sqrt{M\Phi_{\text{зад}}}}\right) - \exp(2N^{-2})\Phi\left(-\frac{M+\Phi_{\text{зад}}}{N\sqrt{M\Phi_{\text{зад}}}}\right), & \text{если принято } DN \text{ – распределение.} \end{cases} \quad (2.9.15)$$

Определенный остаточный ресурс сравнивается с предельным значением $\delta_{\text{пр}}$, рассчитываемым для каждого ЭМО статистически.

Таким образом предлагаемые решения позволяют повысить эффективность диагностики ЭМО ГиНГП по следующим критериям:

1. Увеличение селективности за счет увеличения количества диагностируемых видов дефектов без остановки оборудования.

2. Увеличение надежности диагностики за счет увеличения отношения количества дефектов, обнаруженных системой, к общему количеству возможных дефектов, также за счет увеличения перекрытия различных видов дефектов как минимум двумя диагностическими параметрами.

3. Возможность построения системы мониторинга оборудования, находящегося в труднодоступных местах и тяжелых условиях эксплуатации.

4. Повышение точности диагностики за счет выявления вида и уровня дефекта при различных нагрузках и внешних эксплуатационных воздействиях по сравнению со спектральным методом.

5. Повышение доступности и возможности обслуживания на основе расположения измерительных датчиков в питающем электрическом щите по сравнению с расположением непосредственно на корпусе ЭМО.

6. Повышается возможность интеграции с другими системами, поскольку измеряемые электрические сигналы могут быть получены из интеллектуальных устройств в составе ЭТК.

Повышение эффективности диагностики достигается за счет обобщения методов обработки без увеличения аппаратной части с взаимным исключением недостатков и увеличения полноты информации о состоянии ЭМО [340, 1]. Обобщение методов в комплексный подход диагностики согласно структуре (Рисунок 2.9.2).

Обобщение по применению и возможности идентификации количества неисправностей с комплексной (комбинированной) структурой системы диагностики электродвигателей, охватывающей широкий перечень неисправностей (Таблица 2.9.1), что обеспечивает повышение эффективности диагностики в части точности, быстродействия с выявлением вида дефекта и возможностью оценки технического состояния и ресурса [69].

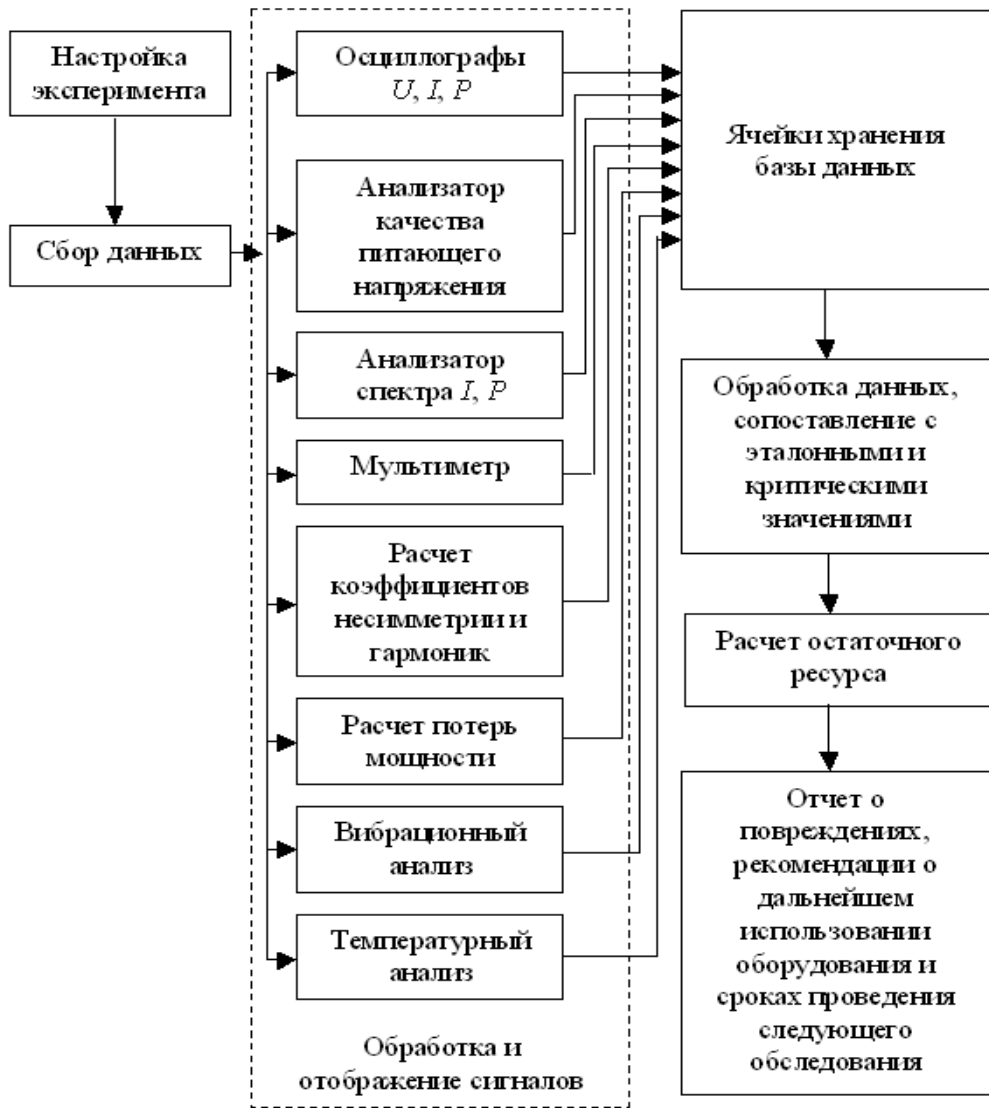


Рисунок 2.9.1 – Обобщенная структура диагностики ЭМО

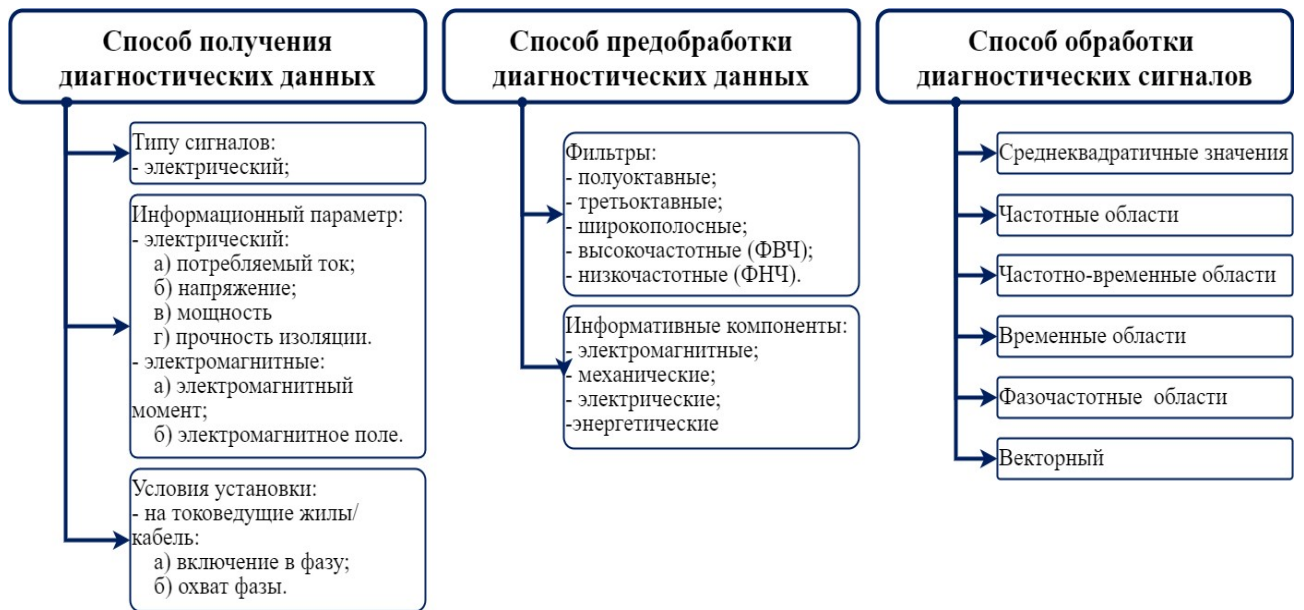


Рисунок 2.9.2 – Методы обработки электрических параметров для диагностики ЭМО без остановки

Таблица 2.9.1 – Применение и возможности идентификации количества неисправностей

Диагностируемый параметр	Виды дефектов асинхронного двигателя														
	Повреждение изоляции обмотки	Повреждение межфазной изоляции	Межвитковые замыкания	Дефект обмотки статора	Короткие замыкания в обмотке статора	Дефекты обмотки ротора	Повреждения подшипников	Повреждения ротора	Повреждение магнит провода ротора	Повреждение магнит провода статора	Динамический эксцентриситет	Статический эксцентриситет	Несимметрия питающего напряжения	Несинусоидальность питающего	Дефект контактных соединений
Вибрация	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	-	-
Действующие значения тока	1	1	-	-	1	-	-	1	-	-	1	1	-	-	-
Действующие значения напряжения	1	-	-	-	1	-	-	1	-	-	-	-	1	-	-
Спектр тока	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	-	-
Спектр напряжения	-	-	-	-	1	-	-	1	-	-	-	1	1	1	-
Динамический коэффициент мощности	-	1	1	1	-	-	1	1	1	-	1	-	-	-	-
Величина потерь мощности	-	1	1	1	1	-	1	1	1	-	1	-	1	1	1
Коэффициент гармоник (тока и мощности)	-	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	1	1	-
Температурный, тепловизионный анализ	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
Уровень электрической прочности изоляции	1	-	1	-	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-

2.10 Выводы по главе 2

1. На основе обобщенного анализа математических моделей и зависимостей установлено, что работа ЭМО в условиях ГиНГП сопровождается интенсивным ростом потерь, которая имеет статическую и динамическую составляющие, обусловленную статической и динамической нагрузкой, что в сочетании с нарушениями качества электроэнергии в электрической сети приводит к снижению энергетической эффективности по причине увеличения потерь и снижению КПД, а также увеличению вибраций, что оказывает влияние на

эффективность и безопасность функционирования ЭТК. Так согласно установленной зависимости потерь электроэнергии в АДКЗ от величины небаланса напряжения уже при 2% рост потерь достигает 10%, а при небалансе 6% дополнительные потери мощности потери возрастают до 50%. Росте вклада ВГС напряжения питающей сети в свою очередь приводит к росту температуры от 1,8 до 2 раз в зависимости от типа машины и класса её энергетической эффективности, при этом наибольший вклад в рост температуры вносит вторая гармоника.

2. Установлено, что рост общих потерь мощности ЭМО и отличие их от номинальных проявляется при наличии дефектов. На примере экспериментальных исследований с поврежденным подшипником показана возможность снижения расхода электроэнергии в пределах 10-14 %, а также до 18% увеличения общего КПД ЭМО после замены подшипника. На примере обрыва стержней ротора АДКЗ показано, что по сравнению с нормальным режимом работы, при наличии только одного поврежденного стержня общие потери увеличиваются на 4%, при этом потери в статоре увеличиваются на 2,6 %, потери на в сердечнике на 20 %, и потери в обмотке ротора на 1 %. Получены зависимости влияния дефектов на остаточный ресурс, так при повреждении одного стержня ток увеличивается на 2%, возникают дополнительные потери мощности, обусловленные наличием дефекта на 1,5%, что приводит к увеличению температуры обмотки на 1%, при этом происходит 10%-ая потеря ресурса АДКЗР. При 6 сломанных стержнях ток возрастает на 12%, что при таком уровне не приводит к отключению тепловой защиты, а дополнительные потери мощности достигают 8%, что по причине роста температура обмотки на 5%, сокращает срок службы двигателя на 45%. Увеличение потерь до 14% при 10 сломанных стержнях приводят к 80% потере ресурса. Также начальная стадия повреждений приводит к увеличению времени пуска на 5% в случае двух оборванных стержней и на 10% при трех оборванных стержнях. Таким образом, при данных условиях АДКЗР технически удовлетворяет всем требованиям непрерывной безопасной работы, однако повреждения увеличивают риск внезапного останова машины.

3. Обосновано что рост дополнительных потерь, обусловленных наличием повреждения вследствие увеличения гармоник в токе статора, насыщения ротора и повышенного нагрева снижает остаточный ресурс изоляции обмоток. Установлено, что наибольший рост потерь происходит при межвитковых замыканиях и обрыве стержней ротора. При оценке влияния роста потерь электрической энергии на сокращение срока службы ЭМО, выявлено, что при 10% роста дополнительных потерь, обусловленных наличием дефектов, ресурс изоляции снижается вдвое, учитывая, что тепловая защита от перегрузок допускает длительное превышение мощности на 20–30%, актуальной является необходимость раннего обнаружения повреждений и разработка алгоритмов определения дополнительных потерь обусловленных дефектами для снижения влияния на остаточный ресурс изоляции.

4. Выявлено, по результатам проведенного имитационного моделирования, влияние наличия и уровня дефекта в виде межвитковых замыканий в лобовых частях обмотки статора и изменениях L_m на характеристики режимов работы электропривода и устойчивость системы управления. Снижение L_m на 10% при нерегулируемом электроприводе приводит к увеличению в 2 раза время разгона, снижение L_m на 20% приводит к увеличению в ~5 раза время разгона до номинальной скорости, при этом электродвигатель не может сформировать электромагнитный момент при максимальной нагрузке. При скалярной системе управления, замкнутой по частоте вращения с ростом нагрузки и с уменьшением L_m КПД и K_M имеют крутопадающую характеристику по сравнению с нерегулируемым электроприводом.

5. По результатам анализа изменения коэффициента пульсаций электромагнитного момента во времени при наличии повреждений на начальной стадии и разных систем управления доказано, что при пуске коэффициент пульсации $\sum K_{Me}$ одномоментно может достигать 20 %. Наибольшие пульсации момента происходят при обрыве стержней ротора и достигают 7% при скалярной и 10% при векторной системе управления замкнутых по скорости. Наибольшее воздействие в критической стадии развития дефекта на пульсации

электромагнитного момента оказывают влияние межвитковые короткие замыкания увеличивая коэффициент пульсаций до 32% и 35%, что требует корректировки алгоритмов управления с целью ограничения нагрузки при наличии дефектов для повышения безопасности эксплуатации.

6. Разработана методология выполнения диагностики и оценки остаточного ресурса без остановки и вывода из эксплуатации ЭМО на основе многофакторного анализа его эксплуатационных электрических параметров и сравнения их с эталонными, полученными на заведомо исправном ЭМО или на основе математических моделей. В качестве показателя технического состояния используется коэффициент изменения потерь в элементах ЭМО, равный разнице относительных потребляемых элементами ЭМО мощностей при определенной величине нагрузки, а также приведенная величина потерь в элементах за время до перехода их в предельное состояние, в котором дальнейшая эксплуатация ЭМО невозможна. Определение вида неисправности происходит на основе частотного анализа тока и мощности, при этом отслеживание динамики потерь мощности на соответствующих частотах позволяют определить вклад неисправности в увеличение потерь. Общая оценка влияния искажений, обусловленных системой электроснабжения и наличием дефектов в ЭМО на энергетические показатели ЭМО, проводится по динамическому коэффициенту мощности, характеризующему соотношение мощности спектра сигнала к полезной мощности при полигармонический составе спектра токов и напряжений.

ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

3.1 Обзор применения технологий искусственного интеллекта для процессов энергообеспечения и обеспечения надежного функционирования электромеханического оборудования

В контексте «Индустрии 4.0» необходим переход к предсказательной системе технического обслуживания и ремонта (ПСТОиР), направленной на то, чтобы эффективно планировать ТОиР, прогнозируя состояние оборудования на основе анализа его работы. Наряду с технологиями диагностики, оценки и прогнозирования остаточного ресурса ЭМО, управления ТОиР совершенствуются технологии автоматизации, в результате чего развиваются технологии гибкости процессов и реконфигурации производства.

Среди различных видов ТОиР предсказательный подход характеризуется: внедрением систем компьютерного управления ТОиР; инвестициями в обучение персонала; технологиями для мониторинга условий и комплексного обеспечения надежности; а также анализа отказов, статистического моделирования, анализа рисков и последствия отказов. Одной из основных особенностей является непрерывный мониторинг параметров ЭМО и технологического процесса. Предсказательная система ТОиР (ПСТОиР) основывается на прогнозе времени выхода из строя оборудования и для её работы необходимы данные систем мониторинга, а также выделение диагностических параметров, которые будут регулярно сниматься и анализироваться для извлечения информации, связанной с различными видами (типами) повреждения оборудования. В данной системе на основе предсказанного времени достижения предельных параметров определяются прогнозные виды и уровни развития дефекта на ранней стадии, при этом нет необходимости математического и физического описания дефектов. Данный подход может быть основан как на экспертных системах и нечеткой логике, так и на собранных данных различной физической природы для обработки

статистическими, стохастическими моделями или моделями и алгоритмами машинного обучения.

Однако для перехода к ПСТОиР необходимо разработать алгоритмы обработки эксплуатационных данных, данных систем мониторинга оборудования и технологического процесса для обнаружения и прогнозирования развития дефектов и остаточного ресурса.

Распознавание дефектов ЭМО является одной из основных задач ПСТОиР, поскольку прогнозирование остаточного ресурса и/или времени выхода из строя оборудования строится на основе прогнозирования развития дефектов. Оценка и прогнозирование остаточного ресурса ЭМО состоит из четырех этапов: сбор данных, определения диагностических признаков, характеризующих ТС, разделение уровня технического состояния и прогнозирование остаточного ресурса.

В реальных условиях технологического процесса допустима неопределенность зависимостей параметров и их влияние на остаточный ресурс, поэтому для поиска знаний необходимо использовать средства искусственного интеллекта (машинное обучение, нейронные сети и др.) [322].

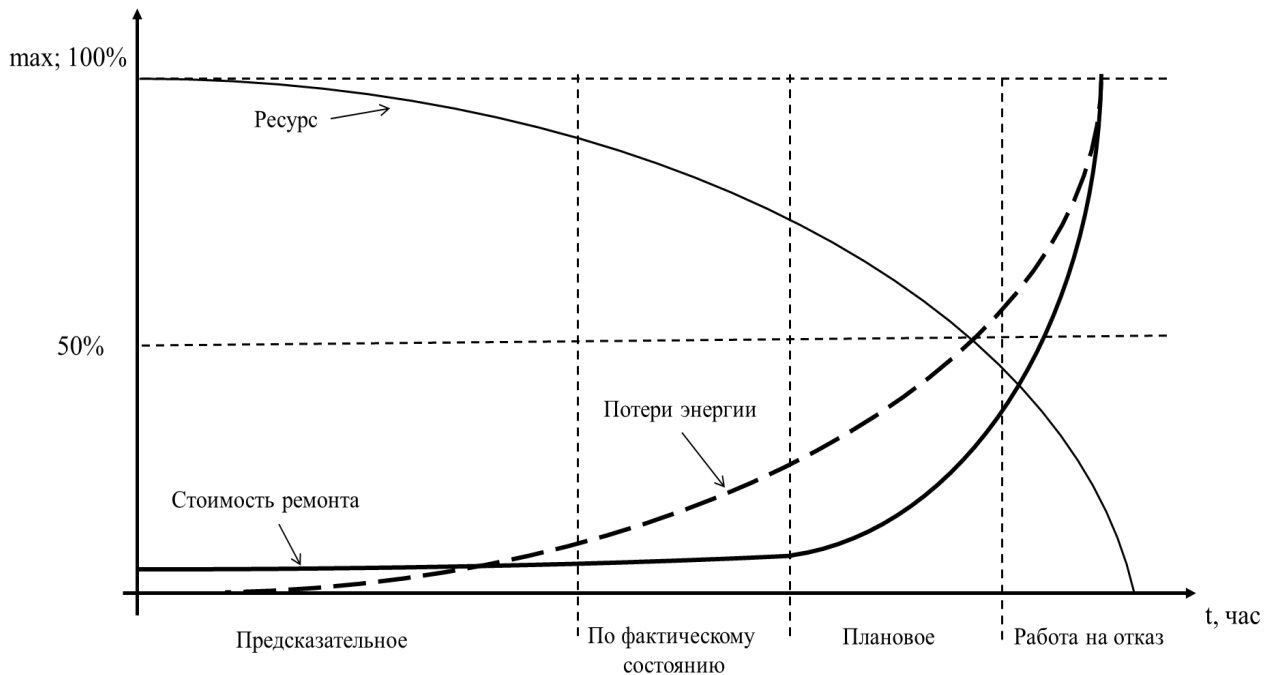


Рисунок 3.1.1 – Сопоставление видов систем ТОиР, потерь энергии обусловленных деградацией ЭМО и стоимости ремонта оборудования

Этап получения данных для ПСТОиР

Сбор данных – это процесс сбора и хранения различных видов данных мониторинга от датчиков, установленных на электромеханическом оборудовании и зонах (этапах) технологического процесса. Система сбора данных состоит из датчиков, устройств передачи данных и устройств хранения данных. Отражать процесс деградации оборудования и появление дефектов могут не только отдельные виды данных, но также их взаимосвязанные изменения. В ГиНГП обычно используют акселерометры, датчики акустической эмиссии, инфракрасные термометры, датчики тока, напряжения и т.д. Собранные данные передаются на ПК или портативные устройства через устройство передачи данных и сохраняются в информационной базе для дальнейшего анализа. С быстрым развитием сенсорных и коммуникационных технологий в ГиНГП применяются все более совершенные устройства сбора и хранения данных, открывающие возможность увеличения объема измеряемой и передаваемой информации. Однако использование этих данных для перехода к ПСТОиР по-прежнему затруднено по следующим причинам:

- деградация ЭМО обычно представляет собой долгосрочный процесс, который может занять несколько лет. Сбор всех данных о работе до момента отказа ЭМО во время такого длительного процесса деградации занимает много времени и средств;
- на практике не допускается, чтобы оборудование работало до отказа, поскольку неожиданный отказ может привести к остановке технологического процесса или к авариям. Это не позволяет получить данные в реальных условиях промышленности;
- ЭМО ГиНГП работают в тяжелых условиях и на данные мониторинга влияет множество помех окружающей среды, что снижает качество данных. Отсутствуют разграничения данных мониторинга, собранных в период простоя, или в режиме без нагрузки, что также влияет на общее качество мониторинговых данных;

– предприятия ГиНПП являются коммерческими и даже в случае сбора данных о работе до отказа ЭМО не размещают свои наборы данных для исследования.

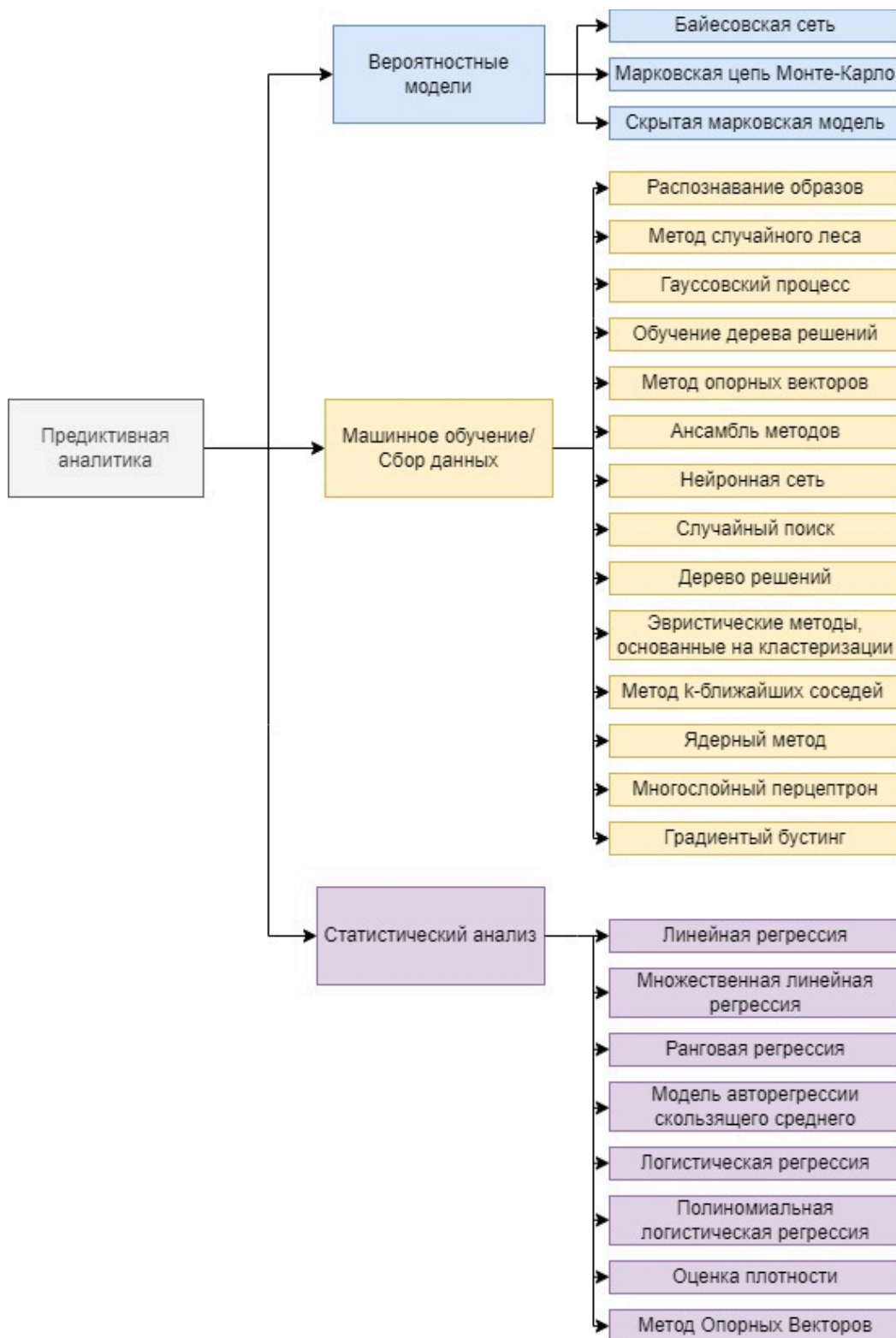


Рисунок 3.1.2 – Основные виды математических моделей, используемые для анализа и прогнозирования в ПСТОиР

Для анализа данных мониторинга, диагностики, оценки и прогнозирования остаточного ресурса используют подходы, основанные на физических моделях, подходы, основанные на статистических моделях, модели ИИ и гибридные подходы.

Подходы, основанные на физических моделях, описывают процессы деградации ЭМО посредством построения математических моделей на основе механизмов разрушения материалов, деталей и узлов для выявления признаков проявления повреждений [208]. Параметры физических моделей коррелируют со свойствами материалов, уровнями напряжений и разрушений, которые определяются с помощью конкретных физических экспериментов или численным анализом методами конечных и дискретных элементов.

Подходы, основанные на статистических моделях, оценивают остаточный ресурс оборудования путем создания статистических моделей, основанных на эмпирических знаниях, и обычно представляют результат прогнозирования ресурса в виде зависимости ресурса от наблюдений одного или нескольких диагностических признаков [186]. Регрессионные модели предполагают, что значение будущего состояния оборудования является функцией прошлых наблюдений и случайных ошибок. В этих подходах модели прогнозирования остаточного ресурса строятся путем анализа моделей случайных процессов, не полагаясь на физическое описание процессов или испытания. Таким образом, подходы, основанные на статистических моделях, эффективны для описания неопределенности процесса деградации и его влияния на прогнозирование остаточного ресурса [200]. Основным преимуществом этих подходов является простота их расчета. Недостаток заключается в том, что их эффективность сильно зависит от информации о тенденциях исторических наблюдений, что со временем может привести к неточным прогнозам.

Вероятностные модели описывают стохастичность деградации путем добавления случайных нормально распределенных коэффициентов в модели деградации. Некоторые модели способны описывать временную изменчивость процессов деградации, они эффективны при моделировании немонотонных

процессов, предполагая случайные воздействия окружающей среды или технологического процесса. Модели гамма-процессов предполагают, что приращения процессов деградации в непересекающиеся промежутки времени являются независимыми случайными величинами с гамма-распределением. Данные модели эффективны только при описании монотонных процессов, а также данные подходы основаны на предположении о Марковском свойстве, т.е. будущее состояние зависит от текущего состояния и не зависит от прошлого поведения, что не всегда работает в реальных промышленных предприятиях. Марковские модели предполагают, что процессы деградации оборудования преобразуются в конечном пространстве состояний в соответствии с принципом марковского свойства [308]. Модели Маркова описывают процессы деградации оборудования, предполагая, что состояние работоспособности можно наблюдать напрямую. Однако в реальной промышленности работоспособность, как правило, невозможно наблюдать непрерывно из-за наличия процессов скрытой деградации, которая не обнаруживается по диагностическим признакам без остановки оборудования. Модели Маркова подходят для рассмотрения многоэтапных переходных процессов деградации. Модели пропорциональных рисков предполагают, что уровень опасности системы состоит из двух мультипликативных факторов, т.е. базовой функции риска и ковариантной функции. Модели способны интегрировать информацию как из данных о событиях, так и из данных мониторинга состояния. Для реализации моделей, необходимо достаточно данных о событиях и данных мониторинга состояния, однако одновременно собрать эти два типа данных сложно. Кроме того, ковариантные функции моделей необходимо описывать с использованием других моделей стохастических процессов, таких как модели Маркова, что усложняет вычисления.

Модели на основе искусственного интеллекта.

Подходы к разработке моделей на основе ИИ базируются на анализе закономерностей деградации ЭМО, опираясь на имеющиеся наблюдения, не используя при этом физические или статистические модели. Методы на основе ИИ способны решать вопросы прогнозирования поведения и деградации сложных

технических систем, процессы деградации которых трудно связать между собой физическими или статистическими моделями. Процесс получения результатов при использовании моделей ИИ трудно объяснить из-за отсутствия прозрачности, поэтому эти методы называют «черными ящиками». Обычно используемые методы искусственного интеллекта в области машинного оборудования включают ИНС, *NF*-системы, *SVM/RVM*, *KNN*, регрессию гауссовского процесса (*GPR*) и т.д.

Однако машинное обучение при диагностике и прогнозировании остаточного ресурса сталкивается с тремя дилеммами:

Качество данных. Редкие и зашумленные данные, ограниченные структурными условиями и стоимостью оборудования для мониторинга. Разреженная и зашумленная информация об отказах из-за ограниченного времени мониторинга и высоких затрат на сбор данных до отказа и эксплуатацию систем мониторинга. Малое количество размеченных данных по причине ограниченного доступа к экспертным знаниям и высокими затратами на маркировку данных вручную.

Отсутствие возможности объяснить результаты работы моделей. Для промышленных областей с высокими инвестициями и рисками ненаблюдаемый процесс между входными данными моделей машинного обучения и выходными результатами прогнозных оценок рассматривается как «черный ящик» с трудностями интерпретации и отсутствием доверия к результатам работы моделей.

Отсутствие всех реальных физических последовательностей в данных для обучения моделей. Алгоритмы машинного обучения обычно строятся на основе размеченных обучающих выборок, которые могут не полностью соответствовать физическим ограничениям и режимам работы.

Гибридные подходы

Все три категории имеют свои ограничения в диагностике и прогнозировании остаточного ресурса. Разработки гибридных моделей машинного обучения (ГММО) объединяет преимущества различных способов посредством их интеграции. ГММО объединяет принципы построения моделей машинного обучения на основе данных, и физических моделей, чтобы повысить точность и

интерпретируемость прогнозов ПСТОиР. ГММО лучше справляется с анализом данных сложных динамических и нелинейных технических систем, к которым относится ЭМО ГиНГП. Это достигается за счет интеграции физических ограничений и уравнений, тем самым расширяя возможности прогнозирования и моделирования.

Сочетание знаний, основанных на физических моделях, позволяет алгоритмам более эффективно обобщать наблюдаемую информацию, получая более точные прогнозы даже при отсутствии данных мониторинга во всех возможных режимах работы оборудования. Это особенно полезно в случаях с ограничением доступных данных для обучающих выборок.

Ключевым преимуществом моделей ГММО является их улучшенная интерпретируемость благодаря использованию ограничений физических параметров и факторов. Это позволяет объяснить основные взаимодействия, управляющие поведением системы, что особенно важно при диагностике и анализе влияния воздействующих факторов. Несмотря на ограниченность данных, эффективное использование знаний физического описания оборудования позволяет делать точные прогнозы, снижая зависимость от больших наборов данных и потенциально минимизируя затраты на их сбор и хранение.

Гибридные модели более устойчивы к шуму и выбросам данных благодаря соблюдению физических законов, которые могут отфильтровывать ошибочные или зашумленные данные.

ГММО обеспечивают вычислительные преимущества за счет объединения физических ограничений с алгоритмами машинного обучения, тем самым создавая эффективные модели, снижающие вычислительную сложность и подходящие для приложений, работающих в режимах, близких к реальному времени. Однако не существует единой стратегии, которая могла бы охватить все аспекты, связанные с мониторингом процесса и обнаружением неисправностей эффективно. Существует необходимость в объединении различных методов и стратегий для того, чтобы разработать наиболее эффективные алгоритмы для перехода к ПСТОиР, чтобы

поддерживать и повышать эффективность в сложных и постоянно развивающихся процессах ГиНГП (Таблица 3.1.1).

Таблица 3.1.1 – Характеристики методов, применяемых к стратегиям мониторинга и обнаружения неисправностей

Характеристика	Подход, основанный на данных		Подход, основанный на предварительных знаниях или моделях		
	Статистические методы	ИИ	Оценка параметров	На основе наблюдений	Равноправные отношения
Простота получения результата	Легко	Легко	Относительно легко	Сложно	Сложно
Способность к диагностике	Удовлетворительная	Очень хорошая	Хорошая	Хорошая	Хорошая
Скорость диагностики	Быстро	Быстро	Быстро для мгновенных отказов, медленно для развивающихся дефектов	Быстро для мгновенных отказов	Быстро для мгновенных отказов
Шумоподавление	Хорошее	Очень хорошее	Слабое	Слабое	Слабое
Способность к обобщению	Слабая	Слабая	Хорошая	Хорошая	Хорошая
Обработка нелинейности	Хорошая	Отличная	Удовлетворительная	Удовлетворительная	Удовлетворительная
Типы устраняемых отказов	В основном отказы технологических компонентов или оборудования	-	В основном отказы приводов и датчиков	-	-
Использование в промышленности	Преимущественно обогатительные фабрики	Различные области применения	Преимущественно машиностроительная и аэрокосмическая промышленность	-	-

3.2 Алгоритм анализа спектра тока АД и формирования диагностических данных

Работа алгоритма строится в соответствии со структурой (Рисунок 3.2.1). По паспортным и конструктивным данным рассчитываются параметры и характеристик АД с определением режима работы [37], частоты проявления дефектов [73, 339, 130]. Затем записываются токи и напряжения во времени с частотой дискретизации $f_d = 10$ кГц, которые предобрабатываются, исключая паразитные частоты, вызванные шумом [1, 139], после чего они нормируются относительно номинальных напряжения питания и тока АД и раскладываются [1] с учётом исключения составляющих, совпадающих со спектром напряжения (Рисунок 3.2.2).

После этого на основе поиска f_{dij} по пороговым амплитудам повреждений $A_{min}(f_{dij})$ [1], формируется матрица, характеризующая наличие или отсутствие дефекта.

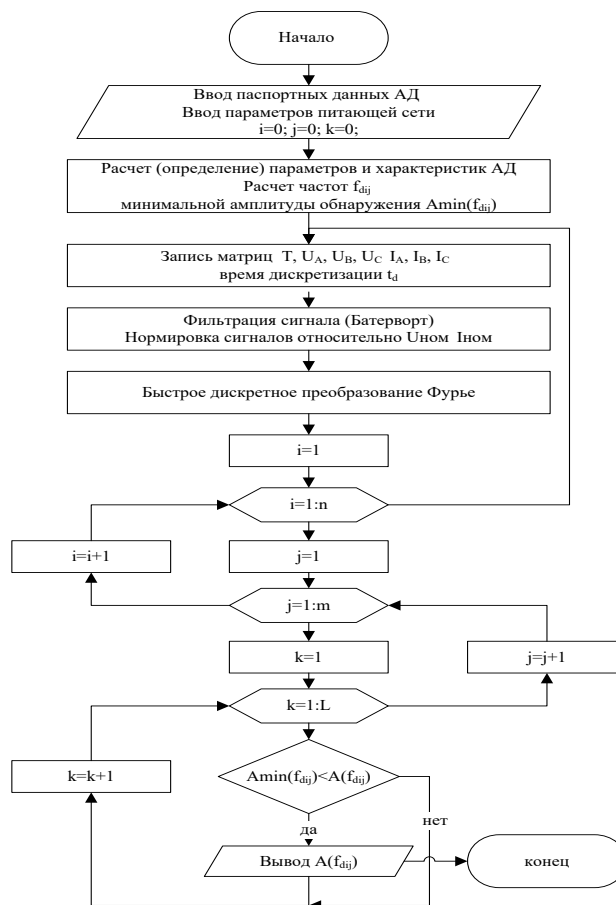


Рисунок 3.2.1 – Алгоритм нахождения соответствующих частот в спектре тока статора АД

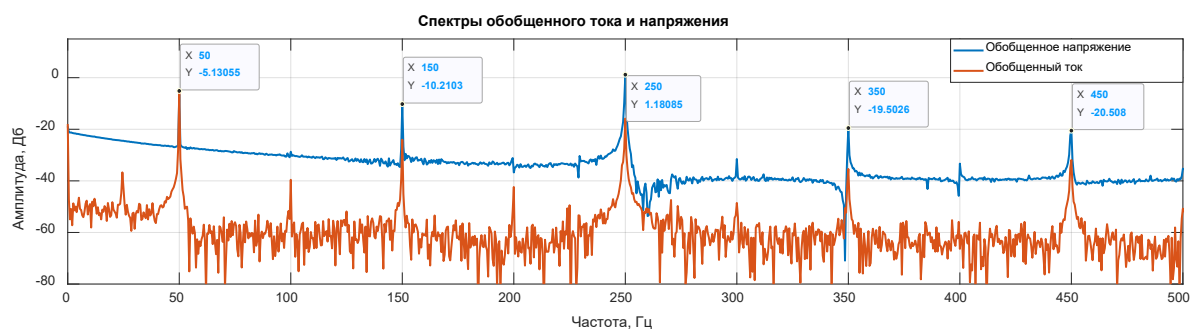


Рисунок 3.2.2 – Спектры обобщённого тока и напряжения

В результате определяются диапазоны пороговых значений амплитуд проявления дефектов и характерных частот (Таблица 3.2.1).

Таблица 3.2.1 – Выявленные диапазоны для диагностирования дефектов АД

Дефект		Частота	Диапазон f_d дефекта Гц	Порог обнаружения Дб	Предельное значение А, Дб	Диапазон вариации амплитуд Δf_d
Статор	Межвитковые КЗ обмоток статора	f_{d11}	70 ÷ 300	-70	-29.0	±0.8
	Асимметрия статора	f_{d12}	900 ÷ 1200	-63	-45.0	±0.4
Ротор	Обрыв стержней ротора	f_{d21}	30 ÷ 70	-60	-25	±1.2
	Асимметрия ротора	f_{d22}	до 30	-57	х	х
Эксцентриситет	Статический эксцентриситет	f_{d31}	400 ÷ 2500	-72	-23.0 -23.0	±1.5
	Динамический эксцентриситет	f_{d32}		-75	-24.0 -26.6	±1.5
Подшипники	Тела качения	f_{d41}	80 ÷ 140	-65	-35.0	±0.5
	Внутреннее кольцо	f_{d42}		-62	-39.0	±0.5
	Внешнее кольцо	f_{d43}		-64	-31.0	±0.5

3.3 Алгоритм оценки состояний

При помощи обобщённого вектора тока для систем мониторинга решается задача минимизация обрабатываемых и хранящихся данных, поскольку при дефектах искажения проявляются только в сигнале тока (Рисунок 3.3.1).

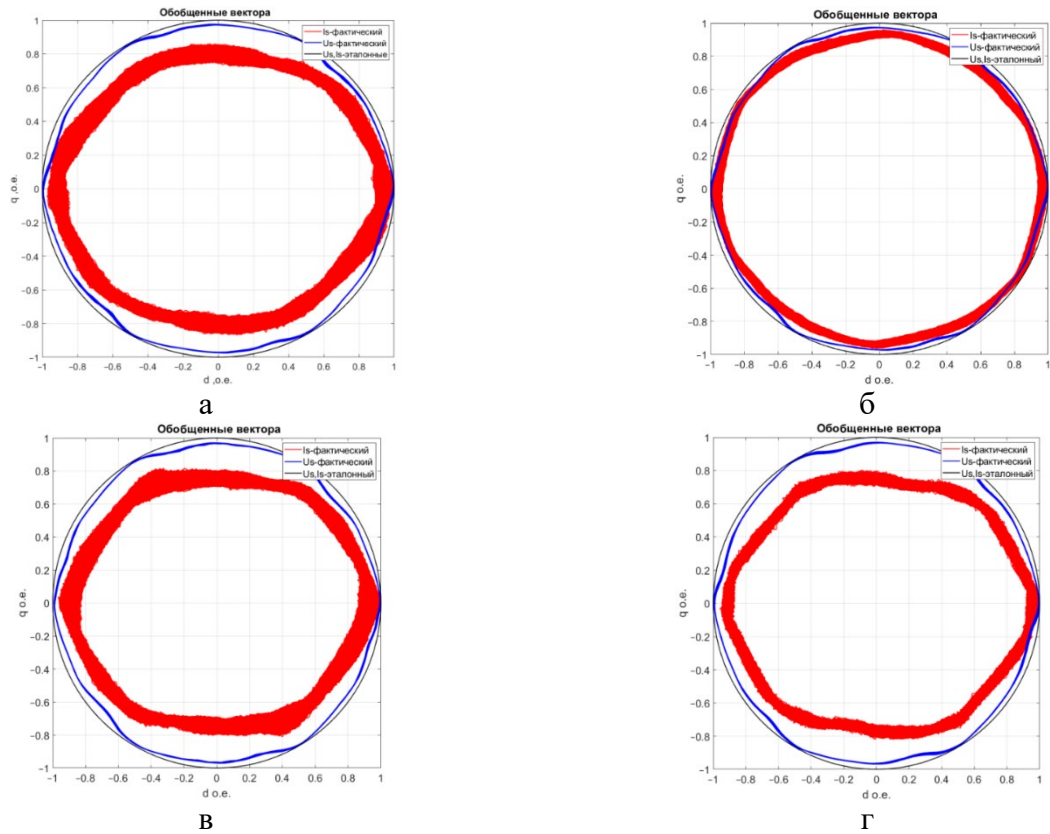


Рисунок 3.3.1 – Годографы обобщенного вектора напряжения и тока: а – режим холостого хода, исправный АДКР; б – номинальный режим, исправный АДКР; в – 1 раковина; г – 3 раковины

Алгоритм базируется на сравнении траектории годографа за один период с предыдущим в виде (Рисунок 3.3.2 а) [237].

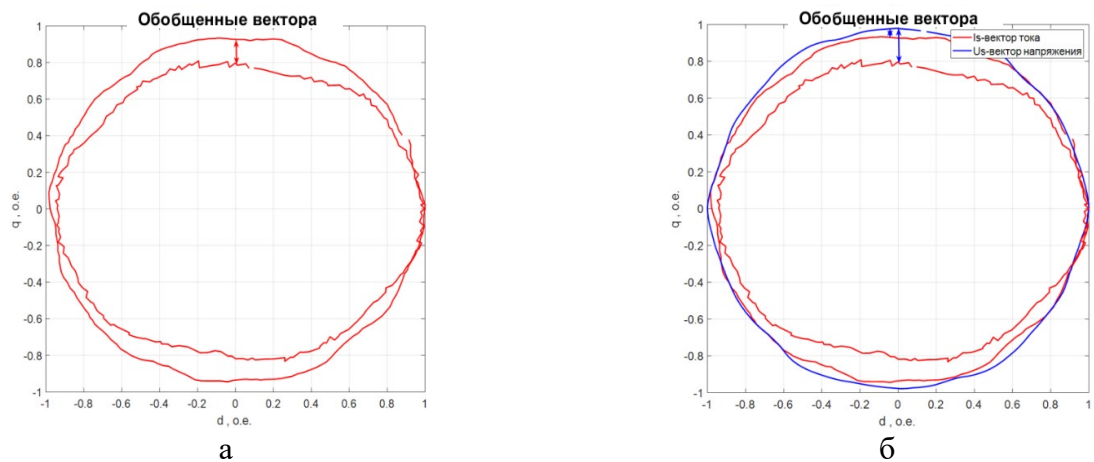


Рисунок 3.3.2 – Девиация годографа тока (а), годографа тока относительно напряжения (б)

Выявленное отклонение тока сравнивается с годографом вектора напряжения (Рисунок 3.3.2 б).

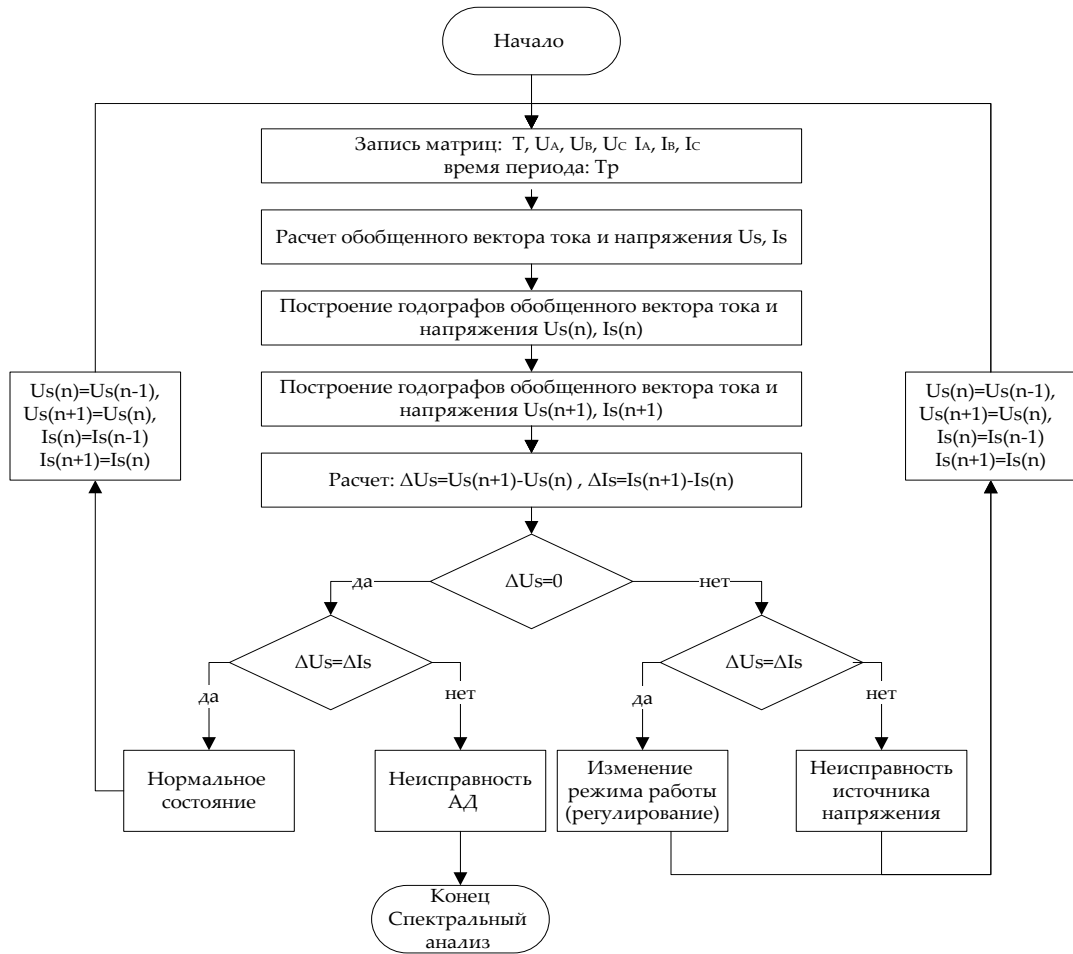


Рисунок 3.3.3 – Алгоритм поиска дефектов по обобщенным годографам тока и напряжения АДКР

Происходит сравнение отклонения годографа вектора тока и напряжения, при этом изменения в форме тока при постоянстве напряжения характеризуют наличие повреждения (Рисунок 3.3.3), поскольку изменения соотношений могут быть связаны с регулированием и изменением режима работы АДКР.

Оценка дефекта производится из соотношения (3.3.1).

$$K_{dij} = \frac{I_{dij}}{I_{ст_max}}, \quad (3.3.1)$$

где $i = \overline{1, n}$; n – количество диагностируемых узлов;

$j = \overline{1, m}$; m – количество неисправностей в узле;

$I_{ст_max}$ – максимально допустимое амплитудное значение фазного тока на выходе инвертора;

I_{dij} – амплитудные значения гармонических составляющих тока, формируемые при дефектах АД.

Диаграмма ТС определяет оценку состояния АДКР [78] (Рисунок 3.3.4 - Рисунок 3.3.6).



Рисунок 3.3.4 – Диаграмма технического состояния: нормальное состояние АДКР



Рисунок 3.3.5 – Диаграмма технического состояния: работоспособное состояние



Рисунок 3.3.6 – Диаграмма технического состояния: неисправное состояние АДКР

Состояние узлов выполняется следующим образом (3.3.2) – (3.3.5).

$$K_{d1j} = \sum_{j=1}^m \frac{I_{d1j}}{I_{ст,max}} \quad (3.3.2)$$

$$K_{d2j} = \sum_{j=1}^m \frac{I_{d2j}}{I_{ст,max}} \quad (3.3.3)$$

$$K_{d3j} = \sum_{j=1}^m \frac{I_{d3j}}{I_{ст,max}} \quad (3.3.4)$$

$$K_{d4j} = \sum_{j=1}^m \frac{I_{d4j}}{I_{ст,max}} \quad (3.3.5)$$

Оценка технического состояния ЭМО, содержащего преобразователь частоты (ПЧ) и исполнительный механизм (ИМ) и ЭД будет заключаться в оценке состояния каждого узла. Например, для отдельно ЭД на основе (3.3.2) – (3.3.5) будет рассчитываться коэффициент $K_{ТС}$ (3.3.6).

$$K_{ТС} = K_{АД} = g_1 K_{d1j} + g_2 K_{d2j} + g_3 K_{d3j} + g_4 K_{d4j} = \sum_{i=1}^n g_i \sum_{j=1}^m \frac{I_{dij}}{I_{ст,max}}, \quad (3.3.6)$$

где g_i – весовые функции, определяемые с учетом критериев энергоэффективности K_I и работоспособности $\sum K_{Me}$.

Пример нормировки уровней технического состояния с учетом пороговых значений частотных составляющих приведен в (Таблица 3.3.1).

Таблица 3.3.1 – Нормированные уровни оценки технического состояния ЭМО

коэффициент технического состояния K_{TC}	Вид технического состояния	Требуемые воздействия
$0 < K_{TC} \leq 0,1$	Исправное состояние	Воздействий не требуется, работа в нормальном режиме
$0,1 < K_{TC} \leq 0,2$	Работоспособное состояние. Проявление отклонений, не оказывающих влияние на энергетические и механические характеристики	Уменьшением интервала измерений, работа в нормальном режиме
$0,2 < K_{TC} \leq 0,4$	Неисправное состояние, с проявлением дефектов, оказывающих влияние на энергетические и механические характеристики	Ограничение нагрузки, реализация алгоритмов упреждающего управления. Реализация постоянного мониторинга
$0,4 < K_{TC} \leq 1$	Неработоспособное	Экстренная остановка

3.4 Способы и устройства диагностики электропривода переменного тока

Представлена структурная схема Приложение А (Рисунок А.2) устройства для диагностики технического состояния и оценки остаточного ресурса электромеханического агрегата с асинхронным двигателем [78, 134, 137].

В Приложении А (Рисунок А.3) представлена структурная схема системы прогнозирования оценки вероятности безотказной работы по диагностируемым электрическим и вибрационным параметрам АД с использованием ИНС.

Согласно Приложению А (Рисунок А.2) статический силовой преобразователь (далее преобразователь) питающей электрической сети формирует на своем выходе амплитуду и частоту напряжения в соответствии с сигналом управления координатами скорости, моментом и положением электродвигателя. Он питает электродвигатель и после электромеханического преобразования подает энергию на вход механического преобразователя (редуктора), а далее на исполнительный орган. Измерительная аппаратура, состоящая из датчиков тока и напряжения, регистрирует трехфазные сигналы тока и напряжения сети с входа преобразователя и входа, датчиков вибрации, установленных на корпусе и регистрирующих вибрации. Запись всех измерительных сигналов и сигнала управления

координатами скорости, моментом и положением электродвигателя осуществляется на плату сбора данных, куда также поступают данные с блока предобработки данных о внешних факторах и данные системы автоматизации технологическим процессом. Из параметров, поступивших на плату сбора данных, формируется основная ретроспективная база данных, которая обрабатывается на портативном компьютере.

Система прогнозирования вероятности безотказной работы ЭД на основе ИНС (Рисунок А.3) реализована следующим образом. От системы автоматизации поступают технологические данные и данные предобработки, формируя дополнительную базу данных косвенных параметров, что при регрессионном анализе позволяет установить ключевые переменные с учетом оценки коэффициентов множественной регрессии, а остальные отсеиваются с учетом оценки значимости коэффициентов корреляции путем ключей-каналов между выходами блока предобработки данных и входами платы сбора данных. Диагностируемые данные, влияющие на прогноз и полученные после регрессионного анализа, поступают на плату сбора данных, как и дополнительные входные данные, формируется база данных для ИНС. ИНС состоит из блока формирования обучающих данных и блока создания ИНС, что определяет тип нейронной сети, количество слоев, количество нейронов и функцию активации. Блоке обучения ИНС задаются параметры и выбранный алгоритм обучения. Блоки тестирования ИНС и оценки качества прогнозирования рассчитывается оценка вероятности безотказной работы ЭД по электрическим вибрационным, а также косвенным параметрам в сравнении с эталонными значениями ЭД. В качестве эталонного значения по прогнозированию вероятности безотказной работы для ЭД по электрическим, вибрационным и косвенным параметрам.

3.5 Способ управления режимами на основе нейросетевого диагностирования неисправностей и технического состояния электромеханического оборудования (ЭМО)

Представлена структурная схема Приложение А (Рисунок А.4) управления режимами на основе нейросетевого диагностирования неисправностей и технического состояния электромеханического оборудования [18, 135].

Набор датчиков контролируемых параметров Приложение А (Рисунок А.4) в количестве $D_i, i = 1 \dots N$, регистрирует параметры ЭМО, которые собираются и отправляются в блок подготовки данных с последующей фильтрацией измерений, проверкой однородности наблюдений и оценкой значимости изменения значений параметров по статистическому r – критерию.

При выполнении условия $r > r_{кр}$, сигналы сравниваются с ограничениями, иначе они из фильтра возвращаются в устройство сбора информации и поступают в блок самопроверки каналов измерений для выявления причин изменения значений параметров, что требует сравнения отклонения значений параметров эталонного ЭМО, хранящихся в базе данных-2.

При превышении 0,95 от заданного уровня параметра сигналы поступают на микропроцессор, который воздействует на систему управления, изменяя режим работы ЭМО, исключая аварийную остановку агрегата, иначе сигналы из блока сверки с ограничениями поступают в блок приведения параметров, в котором параметры приводятся к одним сопоставимым условиям, а затем к средним значениям в блоке усреднения измерений.

Усреднения параметров в постоянном запоминающем устройстве (ПЗУ) формируют базу данных-1, где происходит сбор информации для дальнейшего составления общей базы данных. Далее данные нормируются, переходя к безразмерным величинам в диапазоне $[0 \dots 1]$. После нормирования из данных формируется массив для работы блока ИНС Кохонена-1. Далее происходит сравнение нормированных параметров ЭМО с расчётными ИНС Кохонена-1 с последующим формированием сигнала о выявлении неисправностей ЭМО и

массива данных в виде бинарного вектора $R = \{R_1, R_2 \dots R_m\}$, компоненты определяют класс неисправности ЭМО. Далее производится тестирование результата и оценка вероятности технического состояния ЭМО с учетом выявленных неисправностей на основе анализа вектора R , расчета расстояния K_d с дальнейшим расчетом прогнозного значения нагрузки для ЭМО. Выделяются типичные неисправности с учетом подсистем диагностирования, а также в составе обучающей выборки пять обобщенных классов состояний S_i ЭМО, соответствующие вектору R .

Основу обучения сети НС Кохонена-2 составляет конкуренция между нейронами. Обучение сети представляет процесс подбора значений весовых коэффициентов, которые минимизируют среднеквадратичные ошибки в результате от замены близких вектором весов. Входные векторы кодируются номерами нейронов-победителей (номера кластеров). Таким образом, все векторы из некоторой области входного пространства заменяются одним и тем же опорным вектором, являющимся их ближайшим соседом. Если максимум достигается одновременно на выходах нескольких сумматоров, то выходной сигнал, равный единице, соответствует одному из них, например, первому. Результаты процесса обучения ИНС Кохонена-2 (Таблица 3.5.1) по выявленным классам (подсистемам диагностирования) для ЭМО.

Таблица 3.5.1 – Результаты процесса обучения ИНС

Тип неисправности в ЭМО	Количество возможных состояний (частоты выигрышей)	Количество неблагоприятных состояний (с учетом $d \geq 1$) НС
Система смазки	4	0
Нагнетатель	4	0
Двигатель (обмотка статора)	11	1
Механические дефекты двигателя	6	1
Отсутствуют (эталон)	0	0
Всего состояний	25	-

Определение управления режима работы с учетом нейросетевого диагностирования неисправностей и технического состояния для ЭМО сводится к

нахождению K_d – расстояния до центра ближайшего (p -го) кластера (прецедента), образованного между координатами выявленного кластера S_i (Таблица 3.5.2) и координатами выхода НС Кохонена-2 («нейрона победителя»), дальнейшего расчета прогнозного значения нагрузки для ЭМО.

При этом расстояние вычисляется с использованием евклидовой метрики с учетом коэффициентов, учитывающих работу двух нейронных сетей Кохонена. По значениям компонент R_i можно оценить интенсивность дефекта (чем больше интенсивность дефекта, тем меньше расстояние до соответствующего прецедента). В ходе исследования были получены различные оценки расстояний до центра ближайшего (p -го) кластера (прецедента) для ЭМО по нескольким подсистемам, представленных в (Таблица 3.5.2 - Таблица 3.5.3).

Из таблицы 3.5.1 можно сделать вывод, что полученный коэффициент K_d позволяет не только дать количественный состав оценки расстояния до центра ближайшего кластера, но и выявить неисправность в системе диагностирования ЭМО с учетом кластеризации.

Таблица 3.5.2 – Оценка расстояний K_d до центра ближайшего (p -го) кластера

Значения выходов НС			K_d – расстояние до центра ближайшего (p -го) кластера (прецедента) с учетом состояний			Состояния, S/дефекты
RR_1	RR_2	RR_3	$Sd(SS_0)$	$Sd(SS_1)$	$Sd(SS_2)$	
0,6	0,67	0,46	11,010	0,825	0,906	Система смазки
0,33	0,65	0,7	11,010	0,849	11,167	Нагнетатель
0,001	0,34	0,56	0,655	0,866	11,195	Двигатель (обмотка статора)
0,64	0,715	0,312	11,009	0,767	0,859	Двигатель (механические дефекты)
0	0	0	0	10,000	11,000	Исправное состояние

Таблица 3.5.3 – Оценка расстояний K_d до центра ближайшего (p -го) кластера

Назначения выходов НС			K_d – расстояние до центра ближайшего (p -го) кластера (прецедента) с учетом состояний			Состояния, S/дефекты
RR_1	RR_2	RR_3	$Sd(SS_3)$	$Sd(SS_4)$	$Sd(SS_5)$	
0,6	0,67	0,46	0,872	0,948	0,693	Система смазки
0,33	0,65	0,7	0,567	0,980	11,030	Нагнетатель
0,001	0,34	0,56	0,793	11,143	11,321	Двигатель (обмотка статора)
0,64	0,715	0,312	0,982	11,055	0,555	Двигатель (механические дефекты)
0	0	0	11,414	11,414	11,414	Исправное состояние

Оценка технического состояния ЭМО возможна с учетом разработанной шкалы оценивания по каждой из подсистем диагностирования с учетом выявленных состояний (кластеров) S_i для системы смазки, нагнетателя, двигателя (обмотка статора), механических дефектов, исправного состояния на основе выявленного общего количества возможного состояния дефектов с учетом НС Кохонена-2 и расчета расстояния K_d до центра ближайшего (p -го) кластера (прецедента).

Далее производилась оценка вероятности p_i наступления события с учетом выявленных состояний ЭМО (неблагоприятных) и количества возможных состояний (выигрышных). Были получены шкалы оценивания технического ЭМО с учетом оценки вероятностей по подсистемам диагностирования (Рисунок 3.5.1 - Рисунок 3.5.4), где цифрами обозначен допуск к эксплуатации ЭМО: 1 – исправное; 2 – работоспособен с учетом проведения диагностики; 3 – функционирование с нарушениями, допускается при комплексной диагностике; 4 – не допускается к работе, вывод.

После оценки расстояния до центра ближайшего кластера, оценки вероятности отказа с учетом всех выявленных неисправных состояний для соответствующего класса (подсистемы диагностирования) ЭМО и оценки вероятности отказа с учетом «выигрышных» состояний с помощью НС Кохонена-

2, расчета нагрузки для ЭМО принимается решение последующего допуска к эксплуатации (без ограничения, с ограничениями, остановка ЭМО).

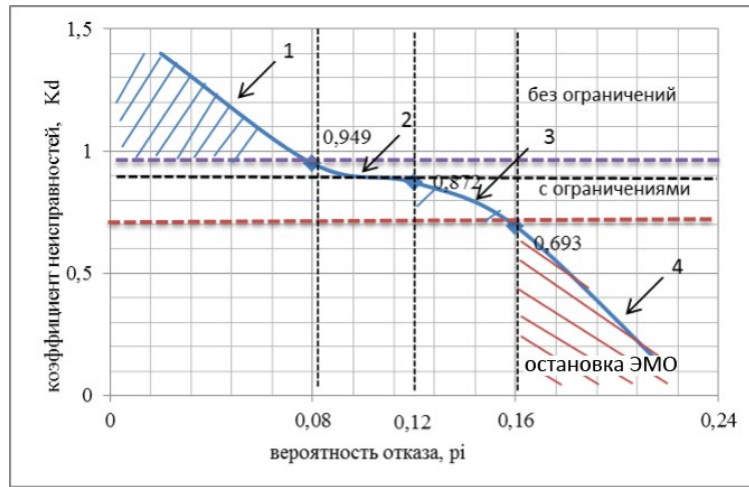


Рисунок 3.5.1 – Оценка технического состояния ЭМО с учетом выявленных неисправностей в системе смазки

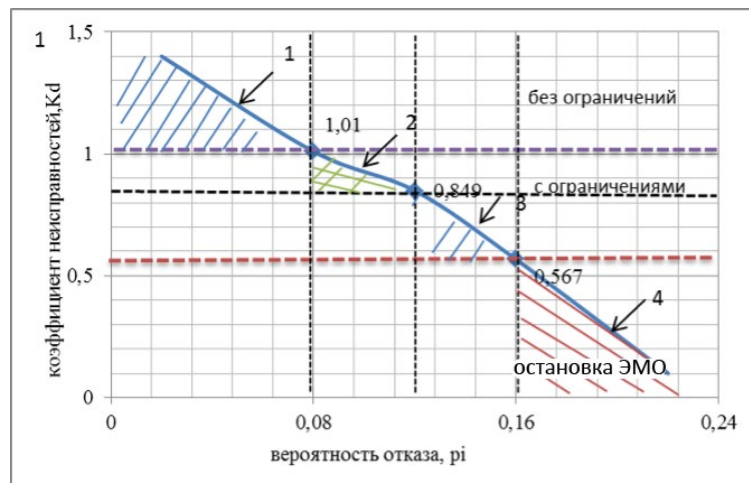


Рисунок 3.5.2 – Оценка технического состояния ЭМО с учетом выявленных неисправностей в нагнетателе

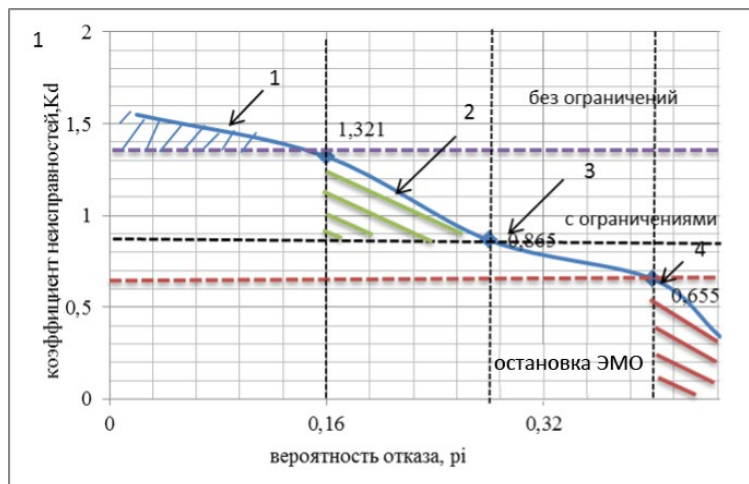


Рисунок 3.5.3 – Оценка технического состояния ЭМО с учетом выявленных неисправностей в двигателе (обмотка статора)

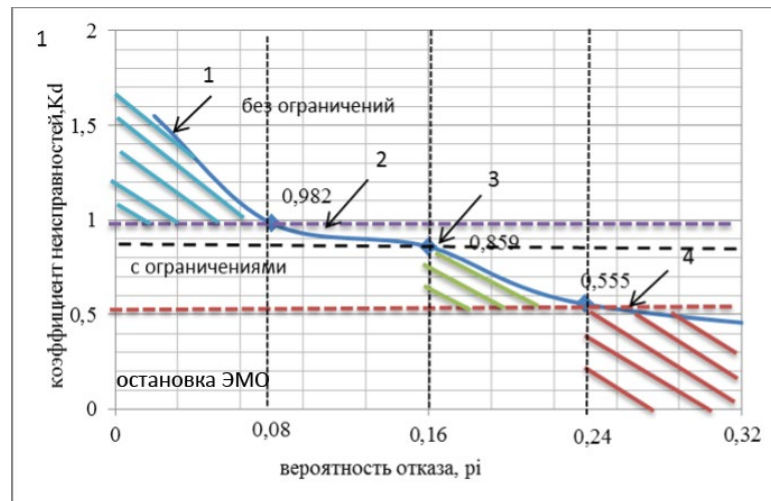


Рисунок 3.5.4 – Оценка технического состояния ЭМО с учетом выявленных неисправностей в системе двигателя (механические дефекты)

По оценке технического состояния блок прогнозирования определяет режим диагностирования (Рисунок А.4), который формирует информацию о наиболее целесообразном режиме диагностирования определенной подсистемы ЭМО, далее сигнал, воздействуя на систему управления ЭМО 9, устанавливает режим работы ЭМО:

- без ограничения режима работы;
- с ограничениями режима работы, с учетом оценки технического состояния ЭМО;
- остановка агрегата.

3.6 Метод оценки технического состояния по расчету вероятности возникновения дефекта

Предлагаемый подход к решению задач повышения точности и качества оценки состояния и остаточного ресурса электромеханического оборудования основан на анализе данных систем учета качества электрической энергии, вибрационных и электрических параметров агрегата с применением ИНС [81].

Система диагностики (Рисунок 3.6.1) представляет аппаратно-программный комплекс, включающий программные алгоритмы анализа данных, основанные на работе ИНС, и систему сбора данных, состоящую из нескольких комплектов датчиков, которые передают сигналы на плату сбора данных. Из полученных

сигналов формируется основная база параметров, в которую также входит дополнительная база параметров (далее косвенные параметры) о техническом состоянии агрегата с блока предобработки данных, состоящая из статических данных (T – средняя температура окружающего воздуха, ρ – влажность, ξ – прочность изоляции и др.) и данных из системы автоматизации технологического процесса (например, $v_r(t)$ – сигнал скорости редуктора, $v_i(t)$ – сигнал скорости исполнительного органа).

Сигналы обрабатываются программным фильтром и записываются на постоянное запоминающее устройство, после чего поступают на вход ИНС, формируя ретроспективную базу данных из основных и косвенных параметров для дальнейшей оценки параметров безотказной работы электродвигателя (ЭД). Оценка технического состояния и остаточного ресурса агрегата производится с помощью ИНС, как оценка вероятности безотказной работы ЭД. Определение вероятности безотказной работы ЭД на основе базы ретроспективных данных при требованиях к относительной погрешности, то есть к пределу доверительного интервала прогнозирования λ при $p \geq 95\%$ – менее 5% можно представить как построение функции (3.6.1).

$$P = F \left(P(t - \Delta t), \dots, P_{im}(m_i), P_i(t - n\Delta t), \dots, P_{ih}(h_i), P_{ih}(t - n\Delta t) \right), \quad (3.6.1)$$

где P_i – прогноз вероятности;

t – текущий момент времени;

Δt – интервал времени между измерениями;

λ – интервал прогнозирования;

n – число интервалов в прошлое;

k – число интервалов в будущее;

l – количество измеряемых характеристик;

$P_{im}(m_i), P_{ih}(h_i)$ – значения вероятностей по электрическим и вибрационным параметрам (m_i – дефект, выявленный при анализе электрических параметров, h_i – дефект, выявленный при анализе вибрационных параметров);

N_i – косвенные параметры, влияющие на составление прогноза по оценке вероятности безотказной работы.

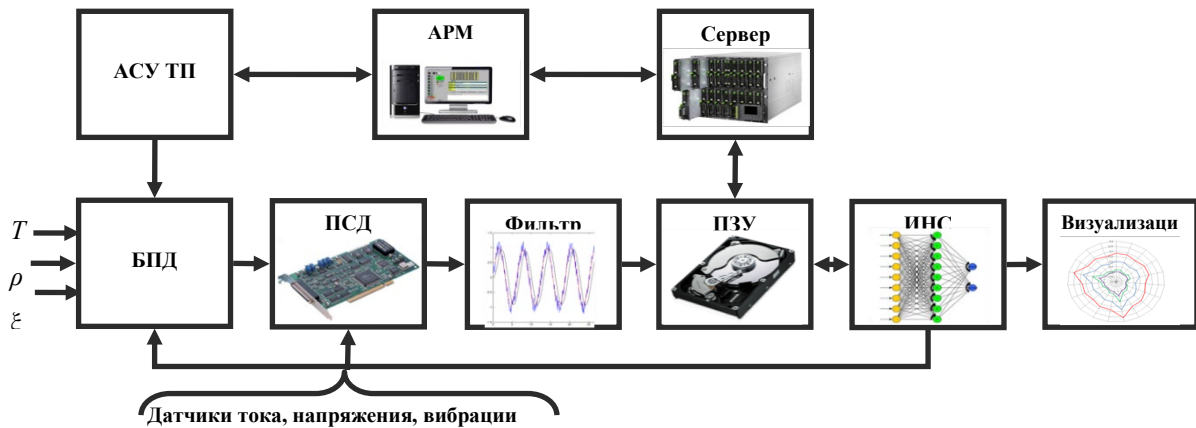


Рисунок 3.6.1 – Структурная схема системы оценки вероятности безотказной работы по диагностируемым электрическим и вибрационным параметрам АД с использованием ИНС, БПД – блок предобработки данных; ПСД – плата сбора данных; ПЗУ – постоянное запоминающее устройство; ИНС – искусственная нейронная сеть

Для работы ИНС необходимо сформировать обучающую и тестовую выборки по диагностируемым параметрам из базы ретроспективных данных, то есть для работы нейронной сети требуются данные, полученные от датчиков. Эти данные могут быть дополнены косвенными параметрами, влияющими на составление прогноза по оценке вероятности безотказной работы, с учетом выполненного регрессионного анализа и оценки значимости коэффициентов корреляции.

Работа ИНС строится следующим образом: осуществляется пуск и установка начальных условий для нейронной сети (значения весовых коэффициентов, количества обучающих образцов, параметров ИНС, заданной малой величины, определяющей точность прогноза), считываются значения измеряемых значений, а затем происходит процесс преобразования в относительные величины Y_i , находящиеся в пределах $(0 \leq Y_i \leq 1)$. Исходными данными для определения вероятностей дефекта с помощью ИНС являлись рабочие, статистические и ремонтные параметры АД.

На основании функции (3.6.1) был составлен алгоритм работы ИНС (Рисунок 3.6.2), с учетом работы системы оценки вероятности безотказной работы

по диагностируемым электрическим и вибрационным параметрам АД с использованием ИНС.

Вход ИНС состоит из блока формирования обучающих данных и блока создания ИНС, который определяет тип нейронной сети, количество промежуточных слоев, количество нейронов и функцию активации. В блоке обучения задаются параметры и выбранный алгоритм обучения. В блоках тестирования и оценки качества прогнозирования производится оценка вероятности безотказной работы ЭД по электрическим, вибрационным и косвенным параметрам в сравнении с эталонными значениями ЭД.

Структурная модель формального нейрона, из которого строится нейронной сеть, предназначенная для задачи прогнозирования представлена на рисунке 3.6.3 [98].

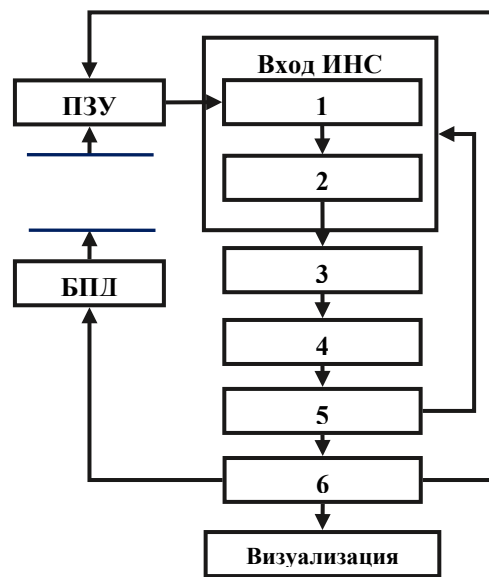


Рисунок 3.6.2 – Структурная схема работы ИНС по прогнозированию вероятности безотказной работы по диагностируемым электрическим и вибрационным параметрам АД: БПД – блок предобработки данных; ПЗУ – постоянное запоминающее устройство; ИНС – искусственная нейронная сеть; 1 – блок формирования обучающих данных; 2 – блок создания ИНС; 3 – блок обучения ИНС; 4 – блок тестирования ИНС; 5 – блок оценки качества прогноза; 6 – выход ИНС

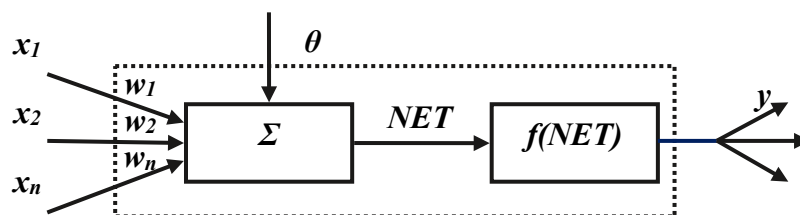


Рисунок 3.6.3 – Модель формального нейрона

Формальный нейрон – это элементарный преобразовательный элемент, имеющий множество входов, на которые поступают сигналы $x_1, x_2 \dots x_n$, суммирующий блок, блок преобразования сигнала с помощью передаточной функции (или функции активации) $f(NET)$ и один выход y . Каждому входу приписан свой «вес» w_i , θ – параметры смещения. Представленный нейрон функционирует в два этапа. На первом – в суммирующем блоке вычисляется величина возбуждения [18], полученного нейроном (3.6.2).

$$NET_{jl} = \sum_i w_{ijl} x_{ijl} + \theta, \quad (3.6.2)$$

где i – номер входа;

j – номер нейрона в слое;

l – номер слоя;

x_{ijl} – i -й входной сигнал j -го нейрона в слое l ;

w_{ijl} – весовой коэффициент i -го входа нейрона номер j слоя l ;

NET_{jl} – сигнал NET нейрона номер j слоя l ;

θ – пороговый уровень данного нейрона.

С точки зрения реализации модели нейрона параметр смещения θ часто представляют в виде единичного входа $x_{n+1} = 1$ с весом $w_{n+1} = \theta$. На втором этапе суммарное возбуждение пропускается через активационную функцию. Результат – выходной сигнал $y = f(NET)$. Преобразующая функция, как правило, должна удовлетворять двум условиям:

1. $f(NET)$ – монотонная (обычно неубывающая) функция;
2. $|f(NET)| \leq 1$;

где F – нелинейная функция, называемая функцией активации

Работа многослойного перцептрона (*Multilayered perceptron* – *MLP*) описывается следующими формулами (3.6.3) – (3.6.5).

$$NET_{jl} = \sum_i w_{ijl} x_{ijl} \quad (3.6.3)$$

$$OUT_{jl} = F(NE_{Tjl} - \theta_{jl}) \quad (3.6.4)$$

$$x_{ij(l+1)} = OUT_{jl} \quad (3.6.5)$$

При оценке качества прогноз на выходе системы сравнивается с фактическим значением параметра, и, когда ошибка будет превышать заданный допустимый уровень (больше 5%), система переобучается заново на новых данных. В случае выполнения условия процесс обучения заканчивается, в противном случае процесс повторяется. В качестве эталонного значения по определению вероятности безотказной работы для ЭД по электрическим, вибрационным и косвенным параметрам Приложение А (Таблица А.2).

После завершения процесса обучения ИНС анализирует качество прогноза на основании полученной вероятности и оценки вхождения ее в диапазон с учетом диагноза по электрическим и вибрационным параметрам, а также оценки следующих характеристик нейронной сети: производительность обучения, тестовая производительность, среднее значение целевой выходной переменной, среднеквадратичное отклонение целевой выходной переменной, средняя ошибка выходной переменной, средняя абсолютная ошибка, отношение стандартного отклонения ошибки к стандартному отклонению данных, коэффициент корреляции Спирмена, вычисленный между целевым вектором и реальным выходным вектором.

Величину остаточного ресурса электромеханического оборудования с учетом работы ИНС (3.6.2) – (3.6.5), выразим как (3.6.6).

$$\delta = K_1 \cdot P_{ih}(h) + K_2 \cdot P_{im}(m) + K_3 \cdot P_{ih}(h) + K_4 \cdot P_{im}(m) = K_1 \cdot F\left(\sum_{i=1}^{17} \Delta w_{ij} \cdot x_{ij} - \Delta \theta_j\right) + K_2 \cdot F\left(\sum_{i=1}^{17} \Delta w_{ij} \cdot x_{ij} - \Delta \theta_j\right) + K_3 \cdot F\left(\sum_{i=1}^{21} \Delta w_{ij} \cdot x_{ij} - \Delta \theta_j\right) + K_4 \cdot F\left(\sum_{i=1}^{21} \Delta w_{ij} \cdot x_{ij} - \Delta \theta_j\right), \quad (3.6.6)$$

где K_1 – коэффициент, учитывающий состояния границ оценки вибрационных параметров с учетом обнаруженных дефектов в момент времени t и в зависимости от нормального, предкризисного и кризисного состояний;

K_2 – коэффициент, учитывающий состояния границ оценки электрических параметров с учетом наступления (обнаружения) дефектов в момент времени t и в зависимости от нормального, предкризисного и кризисного состояний;

K_3 – коэффициент, учитывающий состояния границ оценки вибрационных параметров с учетом измеряемых параметров и факторов, влияющих на составление прогноза остаточного ресурса, в момент времени t и в зависимости от нормального, предкризисного и кризисного состояний;

K_4 – коэффициент, учитывающий состояния границ оценки электрических параметров с учетом измеряемых параметров и факторов, влияющих на составление прогноза остаточного ресурса, в момент времени t и в зависимости от нормального, предкризисного и кризисного состояний;

$P_{ih}(h), P_{im}(m)$ – значения вероятностей по вибрационным и электрическим параметрам с учетом работы ИНС (3.6.7).

$$\Delta w_{ij} = \varepsilon(d_j^s - y_j^s) \cdot x_{ij}, \quad \Delta \theta_j = -\varepsilon(d_j^s - y_j^s), \quad (3.6.7)$$

где $\Delta w_{ij}, \Delta \theta_j$ – коррекция для весовых коэффициентов и пороговых уровней, с учетом рассчитанного выхода и сравнения полученного выходного вектора y_s с эталоном d_s ;

ε – скорость обучения ИНС.

Расчетное значение остаточного ресурса, полученное на основе работы ИНС, с учетом электрических, вибрационных и косвенных параметров, обнаруженных дефектов оценивалось в соответствии с границами.

Результатами работы системы диагностики технического состояния и оценки остаточного ресурса электромеханического агрегата с асинхронным двигателем являются диагностические картины вероятностей технического состояния (Рисунок А.5 - Рисунок А.7). На рисунке А.5 представлена диагностическая картина нормального состояния двигателя по всем контролируемым параметрам.

После создания нескольких незначительных искусственных дефектов в ЭМО, были выявлены четыре параметра, отклонившиеся от нормального состояния, при этом общее состояние машины было оценено как предкризисное (Рисунок А.6).

При длительной работе агрегата были выявлены стремительно нарастающие изменения трех параметров, вышедших в зону критических значений, и состояние

агрегата было оценено как кризисное с выдачей рекомендаций по остановке и необходимости ремонта (Рисунок А.7).

3.7 Нейросетевые алгоритмы определения группового состояния электропривода в узлах нагрузки

Важным этапом классификации является этап подготовки данных. Целью данного этапа является выделение существенных признаков. На этапе подготовки данных к классификации происходит выделение существенных признаков выборки данных, по которым возможно проведение классификации. На вход алгоритма, выполняющего классификацию, подается массив значений размерностью 4×1 , где в строках матрицы будут значения I_A , I_B и I_C и время t , в момент которого данные значения получены. Однако, если к теории обработки данных добавить теорию электропривода, можно увидеть, что данный способ не позволит выделить существенный ряд признаков для классификации дефектов. Так как при определении дефектов имеют значение не только текущие значения, но и предыдущие за некоторый период времени, обычно сопоставимый с частотой в электрических сетях. В работе [239] предлагается разбивать получаемые с двигателя измеренные данные на кадры. В качестве длины такого кадра можно взять период колебаний синусоиды. Так как частота стабильная 50 Гц период будет тоже неизменен и равен 0,02 с. При частоте 0,1 мс в качестве входных данных должна использоваться матрица значительных размеров, что негативно скажется на качестве и скорости классификации. Алгоритм предварительной обработки данных, предложенный в данном исследовании (Рисунок 3.7.1).

Достоинством данного алгоритма является независимость от параметра времени получения сигнала, так как в системах синхронизация по времени между устройствами и расчетным алгоритмом является достаточно трудной задачей. Также при применении данного алгоритма необходимо помнить, что классификация не проводится в пусковые моменты двигателей. Таким образом, алгоритм должен предусматривать начало работы с момента времени 2-5 секунд, т.е. времени, превышающее время запуска двигателя.

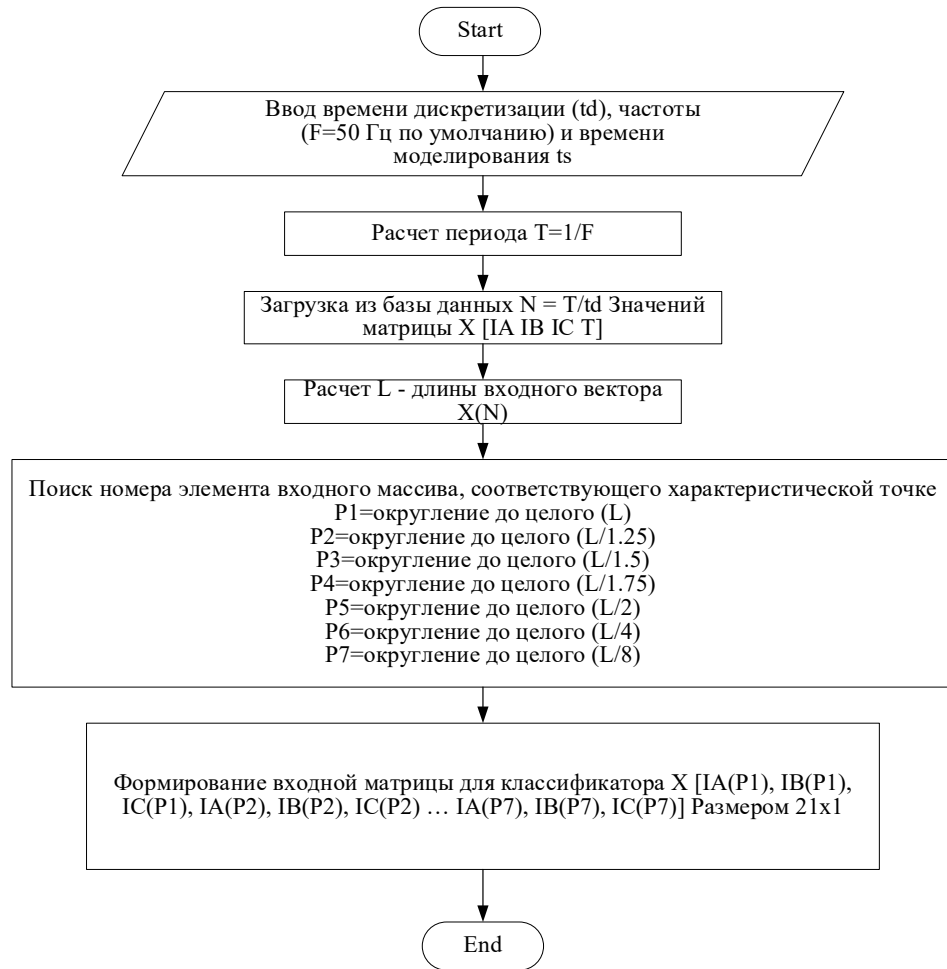


Рисунок 3.7.1 – Алгоритм предварительной обработки данных

Для решения поставленной задачи выявления состояний для группы оборудования в одном узле нагрузки было выбрано 2 наиболее распространенных метода для решения подобных задач классификации – это метод «Машина опорных векторов» (*Support vector machine, SVM*) и метод ближайших соседей (*K-nearest neighbors, KNN*). Однако ввиду того, что данные по дефектам двигателей достаточно массивные, требуется разработка методов облегчения математической или вычислительной нагрузки на алгоритм. Каждому эксперименту, поставленному в данной работе, будет соответствовать свой алгоритм классификации. При этом безусловно в конечном варианте данные алгоритмы должны быть объединены в ансамбль. Алгоритм объединения разработанных алгоритмов классификации в ансамбль представлен на (Рисунок 3.7.2).

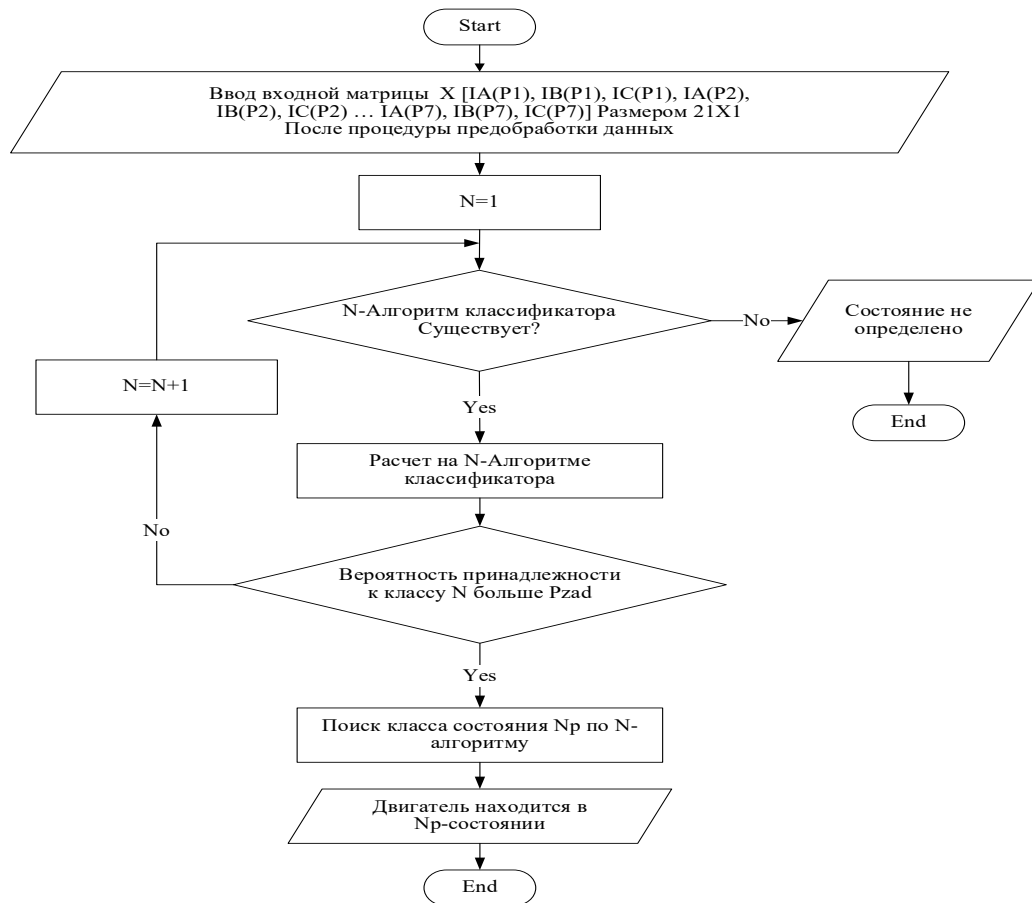


Рисунок 3.7.2 – Алгоритм ансамблированного обучения

Алгоритм (Рисунок 3.7.2) является адаптированным под решаемые задачи алгоритмом *stacking*-принципа ансамблирования [270]. В данном алгоритме важным вопросом является расчет вероятности принадлежности к классу N . Данный параметр будет определяться на основе нейросетевого алгоритма, решающего задачу регрессии, где вероятность принадлежности высчитывается регрессионной моделью, предварительно обученной на имеющейся информации.

3.8 Моделирование узла нагрузки с группой электромеханического оборудования

Имитационная модель (Рисунок 3.8.1), включающая в себя модели трех асинхронных двигателей (Таблица 3.8.1, Таблица 3.8.2).

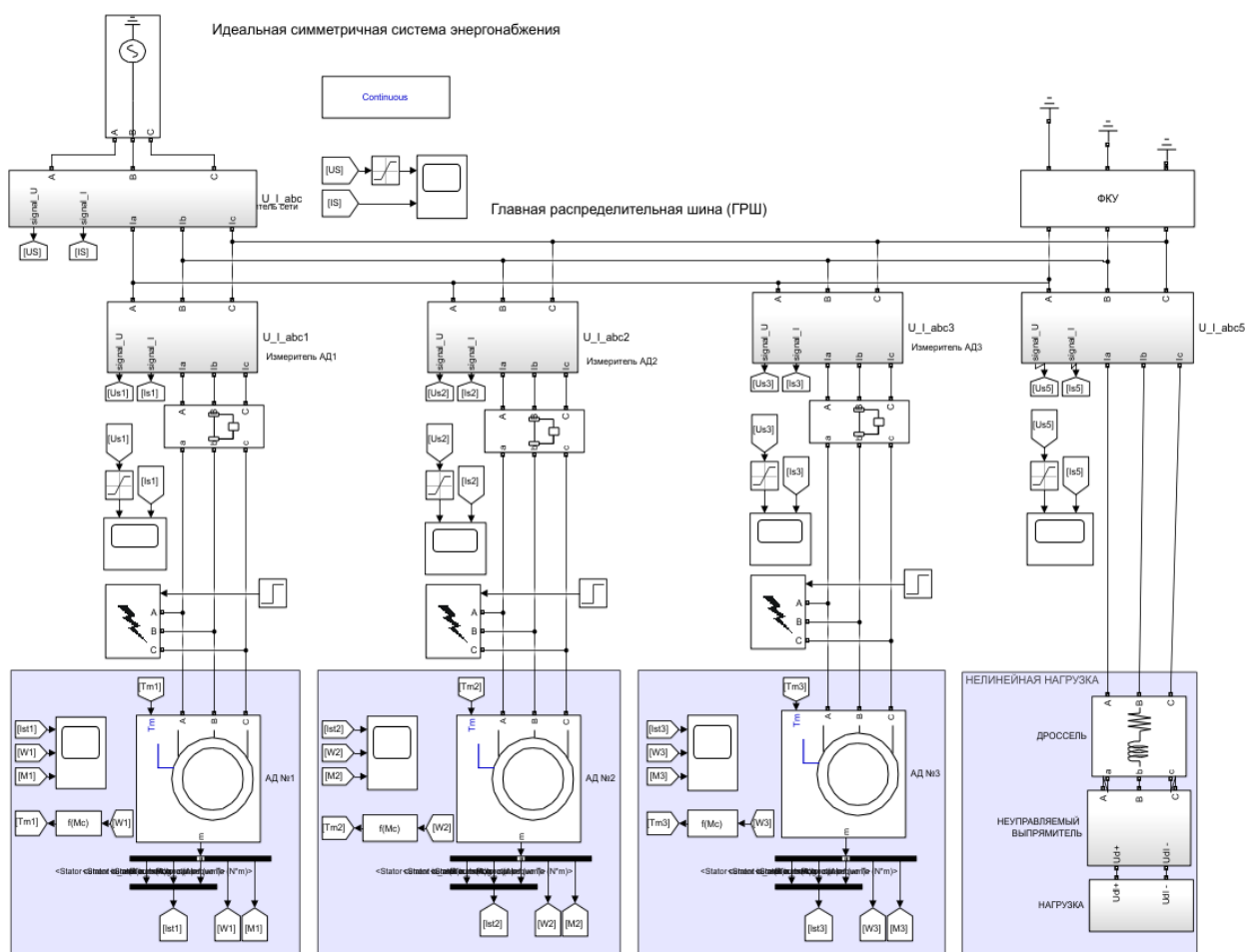


Рисунок 3.8.1 – Имитационная модель системы электроснабжения группы асинхронных двигателей

Таблица 3.8.1 – Параметры двигателей

Усл. обозн.	Наименование	Мощность $P_{НОМ}$, кВт	Ток, $I_{НОМ}$, А	n об/мин	$\cos \varphi$	КПД, %	λ	K_p	K_i
АД №1	АИР 71 В4	0.75	2.00	1360	0.80	71.3	2.3	2.2	5.7
АД №2	АИР 80 В4	1.50	3.60	1390	0.80	78.7	2.3	2.3	6.2
АД №3	АИР 132 М4	11.00	23.40	1450	0.82	87.1	2.3	2.2	6.8

Примечание: $U_{НОМ} = 380$ В, двигатели подключены по схеме «звезда», λ – перегрузочная способность, K_p – кратность пускового момента; K_i – кратность пускового тока.

Таблица 3.8.2 – Параметры схемы замещения двигателей

Усл. обозн.	Наименование	L_s , Гн	L_r , Гн	L_m , Гн	R_s , Ом	R_r , Ом
АД №1	АИР 71 В4	1.4880	1.4913	1.4782	15.5812	8.8305
АД №2	АИР 80 В4	0.8282	0.8353	0.8071	7.2652	4.0851
АД №3	АИР 132 М4	0.1456	0.1475	0.1402	0.5216	0.3055

Эксперимент 1. Определение количества и типа двигателей, находящихся в работе при разной мощности двигателей.

Условия для проведения экспериментов – попеременное включение двигателей в работу. В ходе проведения экспериментов формируется 8 наборов данных, соответствующих восьми классам. Каждый класс представляет собой данные с определённым состоянием двигателя (всего 3 двигателя, 9 состояний, состояние все двигатели выключены не учитывается).

Эксперимент 2. Определение количества двигателей, находящихся в работе при одинаковой мощности двигателей.

Условия проведения эксперимента соответствуют Эксперименту 1. В данной серии экспериментов формируется 8 наборов данных, соответствующих восьми классам.

Эксперимент 3. Определение режима и нагрузки асинхронного электродвигателя. Эксперимент проводится при вентиляторной нагрузке двигателей разной мощности. Различные комбинации наброса/сброса нагрузки разной величины относительно номинального момента в %, а также его промежутка времени. АД №1 – промежуток 30 сек наброса/сброса на интервале 10-20 сек, АД №2 – промежуток 30 сек наброса/сброса на интервале 14-26 с, АД №3 - промежуток 30 сек наброса/сброса на интервале 8-24 сек. В ходе проведения экспериментов формируется 12 наборов данных, соответствующих двенадцати классам.

Эксперимент 4. Определение неисправности и ее величины с учетом работы и нагрузки асинхронного двигателя. Для проведения экспериментов при работающем электродвигателе с помощью выключателя проводилось закорачивание витков обмотки $W_{к.з}$ на шунт с сопротивлением, которое обеспечивало получение заданного значения тока $I_{к.з}$, что соответствовало возникновению дефекта КЗ витков обмотки с заданной глубиной короткого замыкания (3.8.1)

$$K_{КЗ} = \frac{W_{к.з} \cdot I_{к.з}}{I_H \cdot W_{об}} \cdot 100 \% \quad (3.8.1)$$

Промежутки времени имитации КЗ для каждого двигателя: АД №1 – промежуток 30 сек КЗ в 15 сек, АД №2 – промежуток 30 сек КЗ в 22 сек, АД №3 –

промежуток 30 сек КЗ в 26 сек. В данной серии экспериментов формируется 24 набора данных, соответствующих двадцати четырем классам.

Эксперимент 5. Определение неисправности и ее величины с учетом работы и нагрузки асинхронного двигателя с учетом нелинейной нагрузки в сети. Эксперимент проводится при имитации неисправности (однофазного замыкания) при различной глубине замыкания и учете влияния нелинейных потребителей в точке общего присоединения. В ходе проведения экспериментов формируется 12 наборов данных, соответствующих двенадцати классам.

Результаты работы имитационной модели (Рисунок 3.8.1) системы электроснабжения группы асинхронных двигателей. Значения тока для каждой фазы измеряются на общей шине.

Как видно (Рисунок 3.8.2), значения силы тока стремительно меняются в период времени от 0 до 1 с. Это соответствует пусковому моменту двигателя.

В период времени 1 с амплитудой колебаний силы тока стабилизируется и становится равной 27 А. Кроме того, видны зоны уменьшения амплитуды до 20 А в период времени с 7 до 24 с. Это связано с изменением нагрузки на двигатель в данный момент времени.

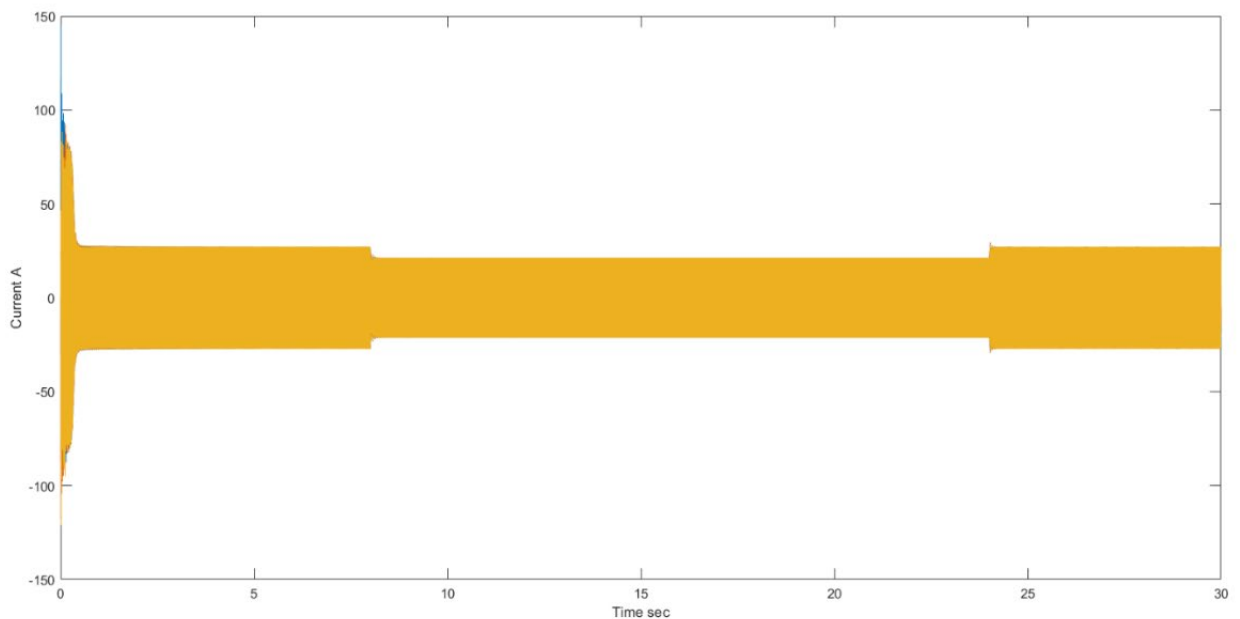


Рисунок 3.8.2 – Результаты работы имитационной модели системы электроснабжения для группы асинхронных двигателей (измерения силы тока на общей шине)

Значения трехфазного напряжения на всем интервале времени моделирования (Рисунок 3.8.3).

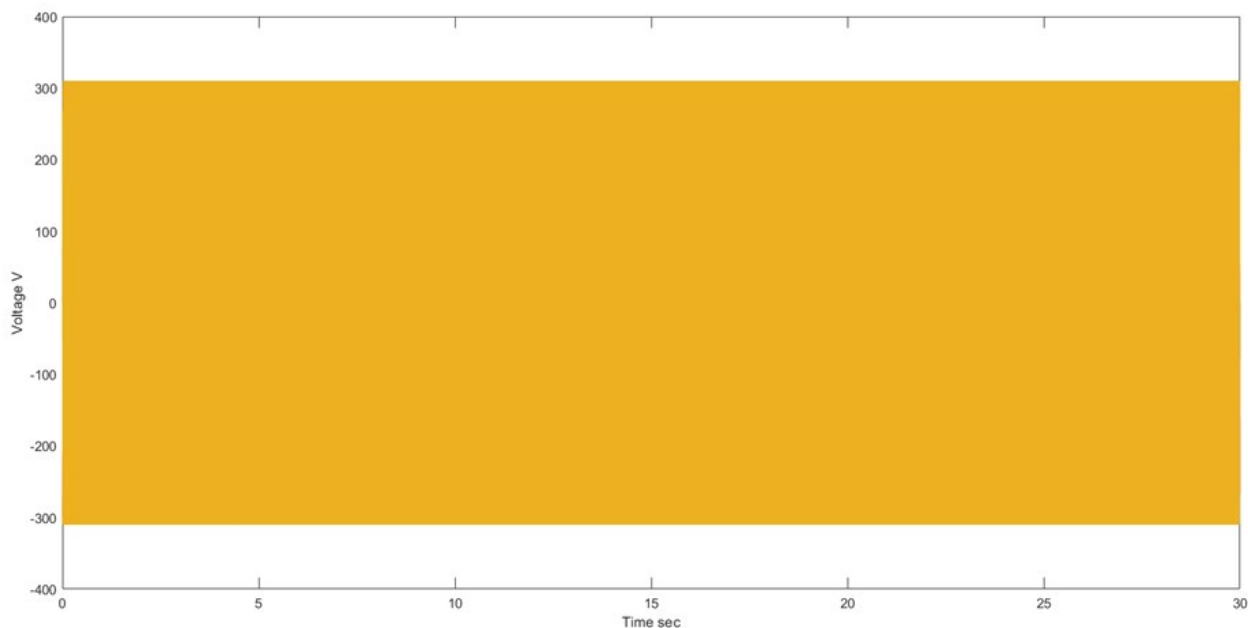


Рисунок 3.8.3 – Результаты работы имитационной модели системы электроснабжения для группы асинхронных двигателей (измерения напряжения на общей шине)

Как видно (Рисунок 3.8.3), значения напряжения стабильны по амплитуде и частоте вне зависимости от внешних факторов и состояния двигателя. В данном виде значения напряжения не подлежат анализу, так как не несут в себе информацию.

До момента времени 1 с амплитуда резко возрастает (Рисунок 3.8.4), что соответствует пусковому моменту. При этом следует отметить более плавный характер изменения силы тока до выхода на установившийся режим. Кроме того, следует отметить отсутствия изменений тока по амплитуде. Это означает стабильное состояние двигателя 1 (Рисунок 3.8.4), а значит нагрузка, подключалась не к первому двигателю.

Рисунок 3.8.5 отражает результаты работы имитационной модели системы электроснабжения для группы асинхронных двигателей (измерения силы тока на общей шине) для момента времени с 7,5 до 7,7 с.

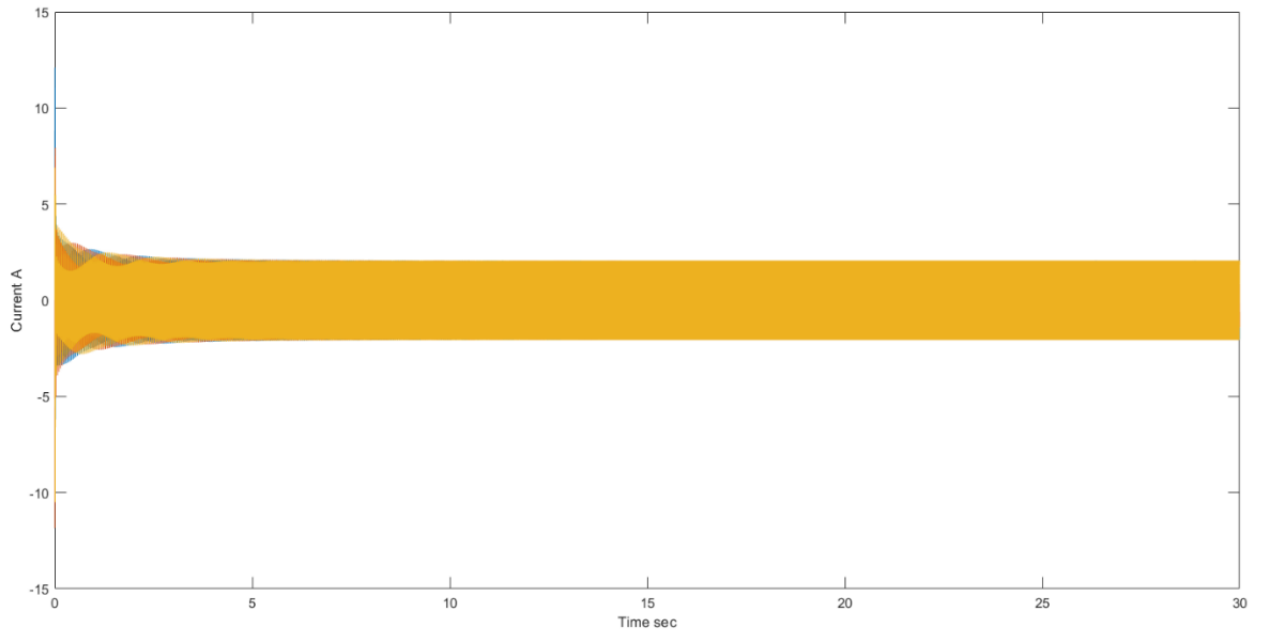


Рисунок 3.8.4 – Результаты работы имитационной модели системы электроснабжения для асинхронного двигателя №1 (измерения силы тока на распределительной шине)

В укрупненном виде (Рисунок 3.8.5) можем наблюдать стабильность изменения силы тока во времени. Это связано со стабильностью частоты, установленной в сетях электроснабжения (50 Гц), и симметричным сдвигом (120 градусов). Данная характеристика имитационных и экспериментальных данных будет использоваться на стадии обработки данных и выделения существенных признаков.

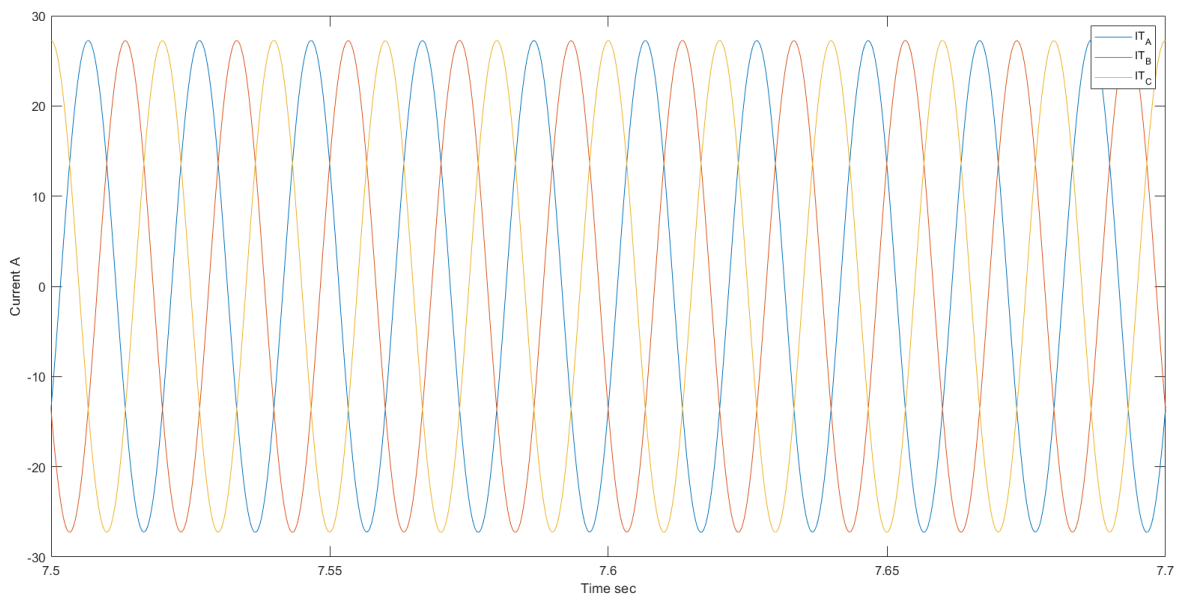


Рисунок 3.8.5 – Результаты работы имитационной модели системы электроснабжения для группы асинхронных двигателей (измерения силы тока на общей шине) для момента времени с 7.5 до 7.7 секунды

Точки на графике (Рисунок 3.8.7) получены путем выполнения алгоритма предварительной обработки (Рисунок 3.8.6). В результате выполнения алгоритма произошло существенное сокращение обучающей выборки. Размер обучающей выборки $21 \times N_k$, где N_k – это количество кадров ($N_k = 30/0.02 = 1500$). Для формирования такой выборки на кадр извлекают 7 характеристических точек. При этом возможно ее дополнительное сокращение до 5 точек.

Однако полностью протестировать такой эффект на модельных данных не представляется возможным, так как они идеализированы и не проходят процедуру фильтрации, так как на них не действуют случайные помехи и возмущения.

Важным фактом при подготовке данных является последовательность данных в обучающей выборке и при подаче в алгоритм классификации. При формировании выборки необходимо соблюдать последовательность точек от увеличения к уменьшению времени или наоборот. Выбранный принцип последовательно восходящего или нисходящего размещения данных должен быть единым в момент обучения тестирования и использования алгоритма классификации.

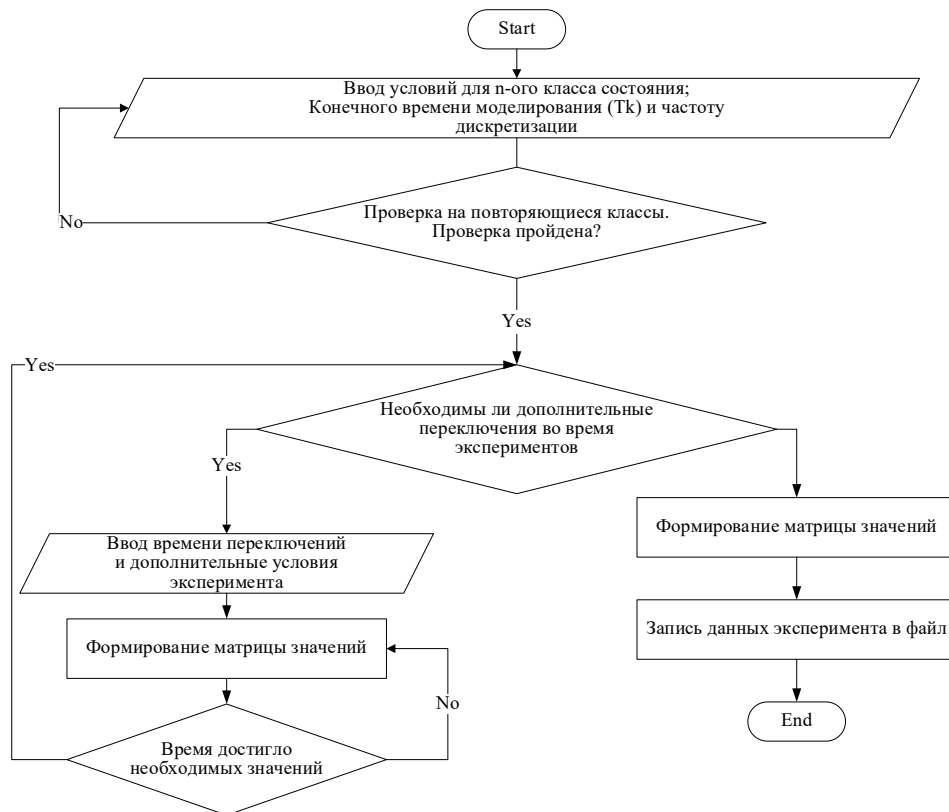


Рисунок 3.8.6 – Общий алгоритм проведения экспериментов

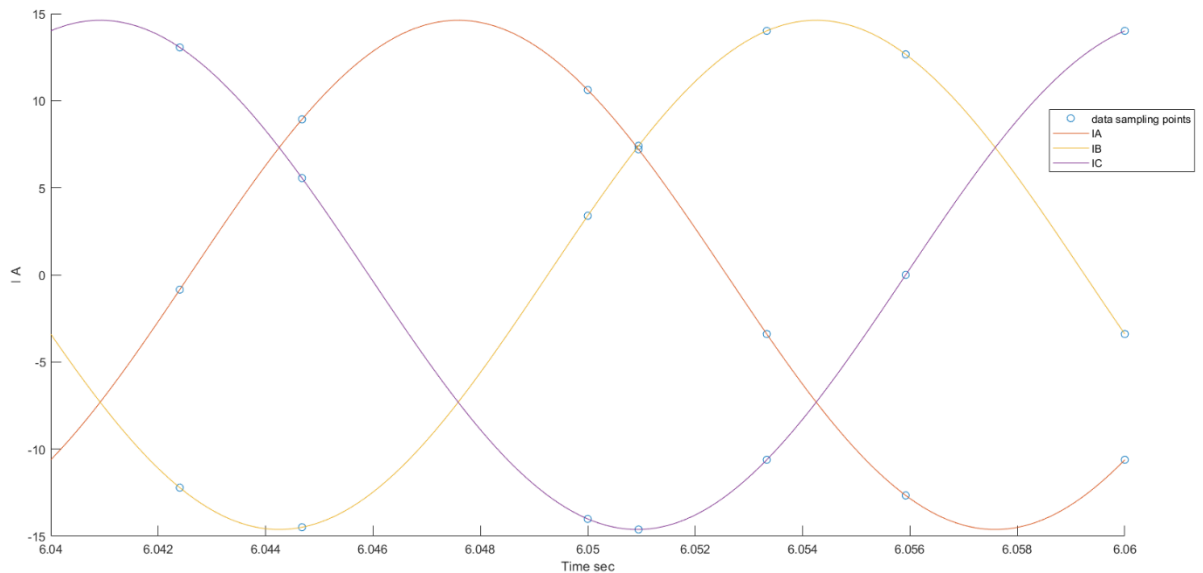


Рисунок 3.8.7 – Визуальное представление результата предварительной обработки данных

Данный момент является существенным при обработке данных и применения алгоритмов классификации. Доля формирования выборки данных для построения модели классификатора в пяти экспериментах время моделирования 30 секунд разделялось на кадры по 2 секунды. В каждом кадре выделялись 7 характеристических точек, согласно алгоритму (Рисунок 3.8.6), и формировался массив данных для обучения, тестирования и верификации классификатора.

Классификация данных в виде экспериментов (Рисунок 3.8.8 – Рисунок 3.8.12).

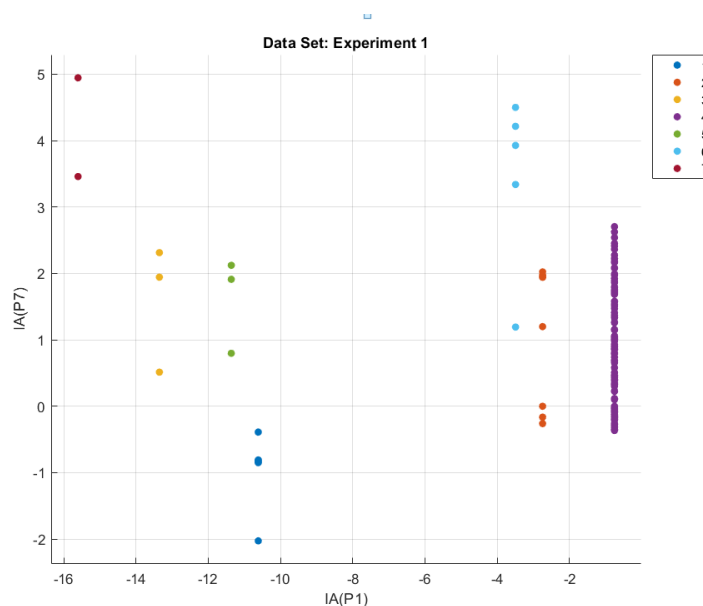


Рисунок 3.8.8 – Набор данных эксперимента

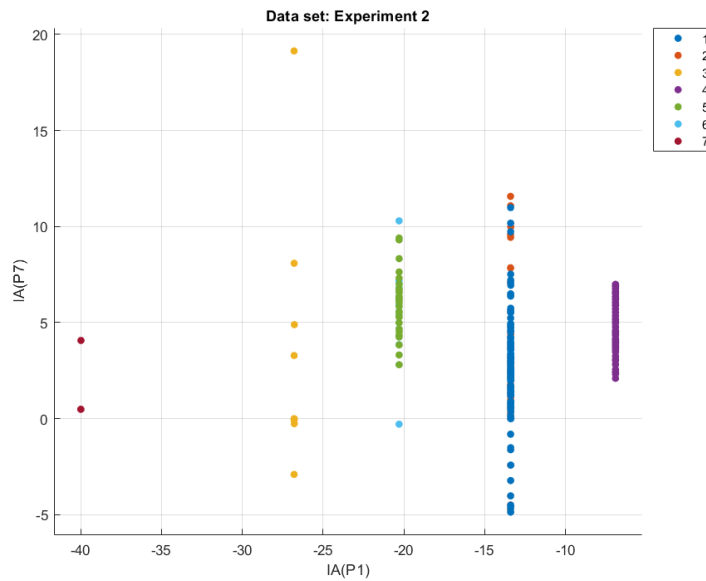


Рисунок 3.8.9 – Набор данных эксперимента 1

Действительно после выполнения обучения по алгоритмам *SVM* и *KNN* ошибки на тестовых данных 0%. Однако при формировании набора данных при сдвиге кадра данных на половину периода, то есть на 0,01 с, точность данной модели существенно снизилась и составила 70%. Для решения данной проблемы модель была переобучена дополнительно не только с выборкой данных точек по кадру, равному 1 периоду, то есть 0,02 с, но и на данных полупериода. После переобучения точность повысилась до 89%. Таким образом, для увеличения точности обучающая выборка должна быть расширена и включать в себя данные, разбитые по полупериоду.

Визуализация набора данных эксперимента 2 показала избыточное введение классов для второго эксперимента. Классы 1 и 2 полностью накладывались друг на друга, такая же ситуация с классами 5 и 6. В данном эксперименте можно снизить количество классов с 7 до 5.

Результаты обучения по данной модели классификатора были схожими с результатами эксперимента 1. Для нивелирования данного факта в дальнейшем в алгоритм проведения экспериментов (Рисунок 3.8.12) добавлен оператор для проверки данных на повторяющиеся классы.

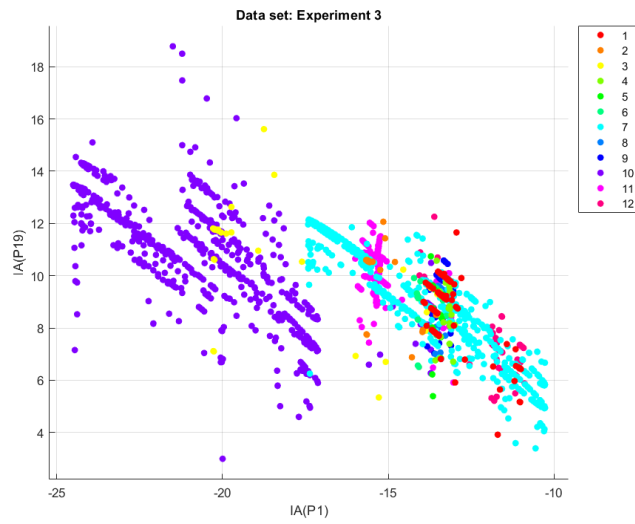


Рисунок 3.8.10 – Набор данных эксперимента 3

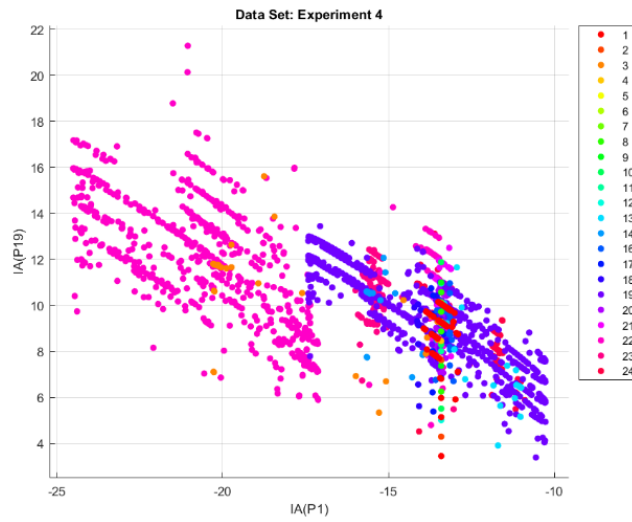


Рисунок 3.8.11 – Набор данных эксперимента 4

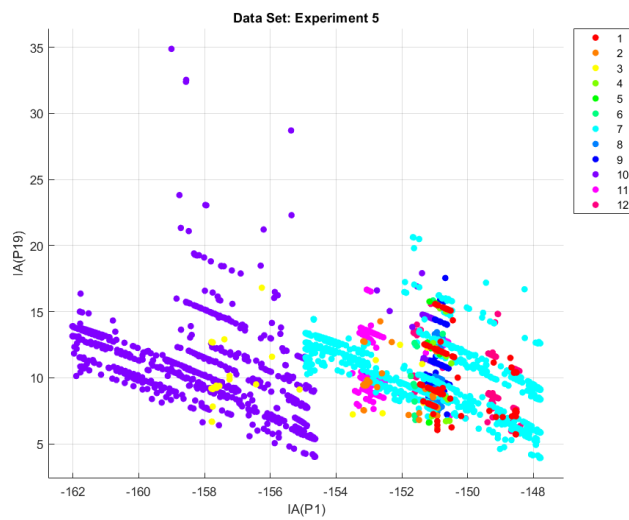


Рисунок 3.8.12 – Набор данных эксперимента 5

Представлена матрица ошибок (*confusion matrix*), полученная после проведения классификации способом *SVM* (Рисунок 3.8.13).

Confusion Matrix (Experiment 5)

1	90%			7%	4%	6%	<1%						8%
2	<1%	90%	<1%	6%	4%	5%							8%
3		<1%	91%	6%	4%	4%	<1%			9%	<1%	<1%	
4	<1%			25%	8%	9%	<1%	<1%					
5				10%	40%	8%	<1%		<1%				
6				11%	7%	44%	<1%	<1%	<1%				
7	<1%			7%	7%	5%	98%	3%	1%				<1%
8				7%	6%	5%	1%	97%	1%				
9	<1%			6%	9%	4%	1%	<1%	92%				
10	<1%	<1%	9%	4%	3%	4%				91%			<1%
11		9%		5%	4%	3%	<1%		6%	<1%	92%		
12	10%			5%	3%	3%	<1%			<1%	<1%	92%	
Positive Predictive Value	90%	90%	91%	23%	40%	44%	98%	97%	92%	91%	92%	92%	
False Discovery Rate	10%	10%	9%	77%	60%	56%	2%	3%	8%	9%	8%	8%	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
	Predicted class												

Рисунок 3.8.13 – Матрица схождений результатов

Процесс классификации по наборам данных эксперимента имел одинаковый характер. Модель обучалась по методу (*Simple Moving Average – SMA*). Точность, полученная по исходным данным для всех трех экспериментов, не превышала 67%. Например, для эксперимента 5 точность оставила всего 63,7%. При этом *Confusion matrix* для эксперимента 5 показывает, что основная проблема, влияющая на показатели точности, заключается в классах 4, 5 и 6. После удаления этих классов классификатор обучился с точностью 84,7%, что существенно улучшило результаты.

При этом организация классов 4, 5 и 6 и создание под них отдельного классификатора показывает, что точность данной модели 92,1%. Таким образом, разделение классификаторов для разных наборов данных и последующее его ансамблирование является способом более предпочтительным и легким в реализации, чем обучения модели классификатора сразу на всех данных.

3.9 Разработка программного датчика для обнаружения повреждения подшипника

Научный интерес представляет поиск программно-аппаратных решений, обеспечивающих обнаружение неисправностей подшипников на минимальных стадиях развития с минимальным количеством датчиков. В связи с этим разработка программных датчиков (виртуальных датчиков) является актуальной задачей. Он позволяет в режиме реального времени измерять различные параметры, которые впоследствии могут быть использованы для диагностики и оценки технического состояния электрических машин.

В ряде работ, рассматривают преимущество использования программных датчиков и принципы его разработки для различных отраслей промышленности [207]. Например, в статье [213] рассматривается один из вопросов отказоустойчивости электропривода с прямым полеориентированным управлением асинхронным двигателем (*Direct Field Oriented Control*). Важным моментом является некорректная работа системы управления при неисправном датчике тока Холла. Предложено использование нейронной сети для определения состояния датчика тока статора. Рабочая сверточная нейронная сеть (*CNN*), объединяющая алгоритм сопоставления признаков в частотной области (*Frequency-division multiple access, FDFM*), используется для диагностики подшипников качения [320].

Анализируя имеющиеся подходы, предлагается объединить диагностику электромеханических машин, теорию Парка и теорию нейронных сетей для создания программного датчика, который можно использовать для диагностики технического состояния электромеханического оборудования.

Программный датчик, представляющий собой математический аппарат, сочетающий векторное преобразование Парка и классификатор на основе искусственной нейронной сети (ИНС-классификатор), позволит в реальном времени (или частоте, подходящей для использования в системах управления) обнаруживать дефекты подшипников в электромеханических машинах. В качестве основного диагностического узла в данном случае выбран подшипник, так как

подшипник в большей степени подвержен износу за счет сил трения, чем другие детали машины, а также последовательному выходу из строя всех остальных деталей.

Преобразования вектора Парка (Горева) [320], заключается в переходе к двухфазной системе токов (i_d, i_q) во вращающейся системе координат- dq от трехфазной системы токов, потребляемых асинхронным двигателем (i_A, i_B, i_C) по следующим преобразованиям (3.9.1), (3.9.2). Данные уравнения справедливы для реального электродвигателя [297, 217].

$$i_D = (\sqrt{2}/\sqrt{3})i_A - (1/\sqrt{6})i_B - (1/\sqrt{6})i_C, \quad (3.9.1)$$

$$i_Q = (1/\sqrt{2})i_B - (1/\sqrt{2})i_C, \quad (3.9.2)$$

где i_d, i_q – токи, потребляемые асинхронным двигателем (АД) в 2-х фазной вращающейся системе координат- dq ;

i_A, i_B, i_C – токи, потребляемые асинхронным двигателем (АД) в 3-х фазной вращающейся системе координат- ABC .

При допущениях, что асинхронный двигатель идеализирован и является трехфазной симметричной активно-индуктивной нагрузкой, справедливы уравнения (3.9.3) – (3.9.4).

$$i_D = (\sqrt{6}/2)i_M \sin(\omega t), \quad (3.9.3)$$

$$i_Q = (\sqrt{6}/2)i_M \sin(\omega t - \pi/2), \quad (3.9.4)$$

где i_M – максимальное амплитудное значение тока фазы, А;

ω – угловая частота питания, рад/с;

t – время, с.

В системе координат- dq обобщенный вектор I_S тока запишется, как (3.9.5), и справедлив к (3.9.1), (3.9.2) и (3.9.3), (3.9.4).

$$I_S = i_d + j \times i_q. \quad (3.9.5)$$

Данные преобразования отображены в векторной диаграмме (Рисунок 3.9.1).

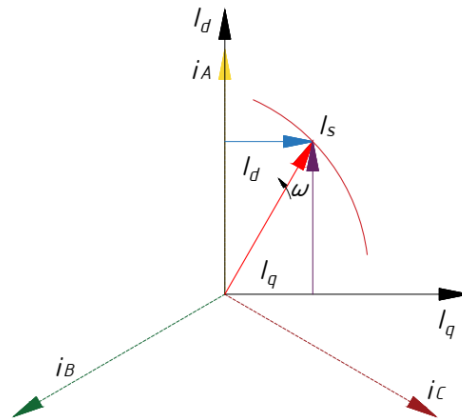


Рисунок 3.9.1 – Векторная диаграмма преобразования Парка (Горева)

Согласно (3.9.5), обобщенный вектор в комплексной плоскости будет описывать траекторию – годограф (Рисунок 3.9.2). Наблюдается искажение траектории реального вектора тока относительно идеального.

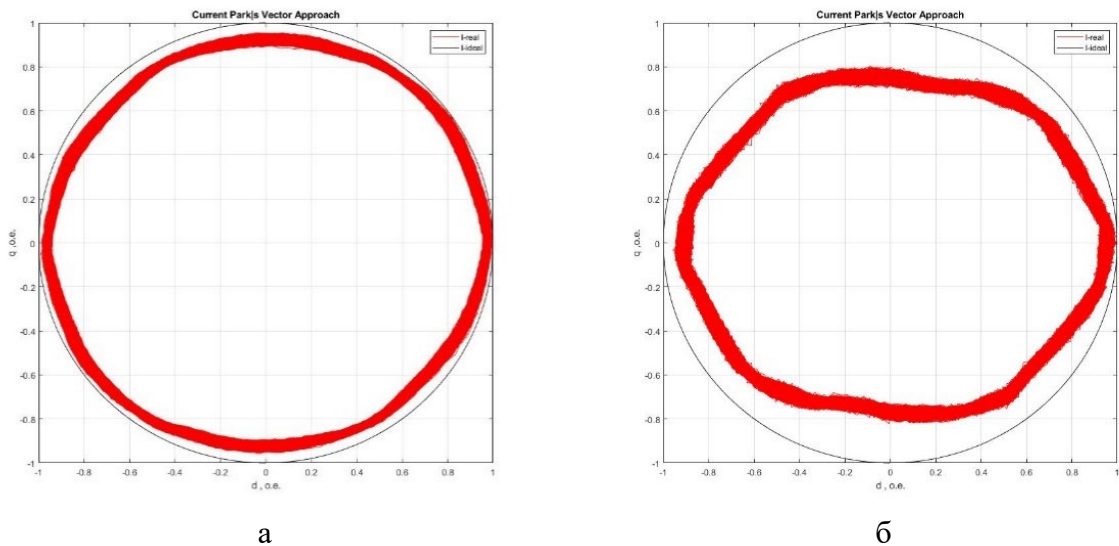


Рисунок 3.9.2 – Годографы обобщенных векторов тока идеального и реального: а – АД без дефектов; б – АД с дефектом

При появлении дефектов асинхронного двигателя в части повреждения статора, ротора или механической части, годограф обобщенного вектора тока изменяется относительно эталонного. В случае нарушения целостности одной из фаз статора годограф вырождается в эллипс (Рисунок 3.9.3 а). Пропорциональное изменение эллиптичности и ширины годографа вектора Парка соответствует уровню дефекта [283]. Нарушение в роторе приводит к вырождению годографа в сложную форму (Рисунок 3.9.3 б) [201]. Повреждения в механической части двигателя приводят к появлению искажений по окружности и варьирование

ширины описываемого годографа (Рисунок 3.9.3 в) [204]. Исследование сложных траекторий позволяет комплексно определять виды и интенсивность влияния дефектов на частоты вращения ротора и момент на валу электродвигателя.

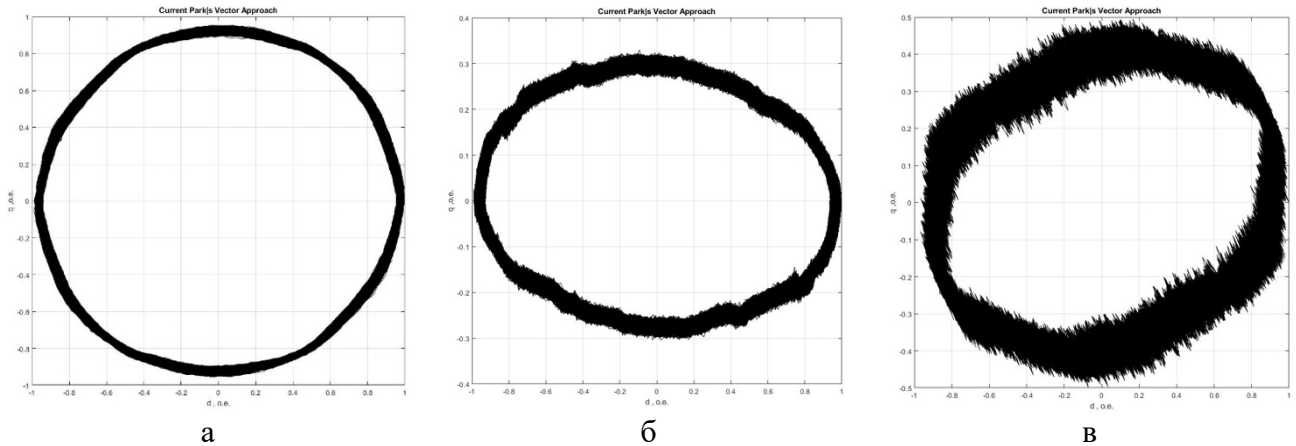


Рисунок 3.9.3 – Годографы обобщенного вектора тока: а – АД без дефектов; б – АД с дефектом статора; в – АД с дефектом подшипников

3.10 Показатели и критерии технического состояния для программного датчика

В качестве энергетического критерия был выбран коэффициент гармонических искажений тока, подводимого к двигателю, – K_I , который учитывается при определении коэффициента мощности при несинусоидальных токах и напряжениях.

Коэффициент мощности при несинусоидальных токах и напряжениях определяется по формуле (3.10.1).

$$\chi = P/S = 3I_{1p}U_{1p} \cos \varphi / 3I \cdot U = (I_{1p}/I)(U_{1p}/U) \cos \varphi = K_I K_U \cos \varphi, \quad (3.10.1)$$

где I_{1p} , U_{1p} – амплитуды основных гармоник тока и напряжения в фазе (А, В);

I , U – действующие значения тока и напряжения (А, В);

P , S – полезная и полная мощности (Вт, ВА);

φ – угол сдвига между основной гармоникой фазного тока и напряжением (рад);

K_I – коэффициент синусоидальности тока (о.е.);

K_U – коэффициент синусоидальности напряжения (о.е.).

При питании электродвигателя от автономного инвертора напряжения действующее значения тока I будет определяться током статора I_{st} , описываемого формулой (3.10.2).

$$I = I_{st}(t) = I_n \sin(n\omega_1 t + \varphi) + I_m \sin(m\omega_n t) = \sum_{m=1}^{m=\infty} \sum_{n=1}^{n=\infty} I_{nm} \sin(m\omega_n \pm n\omega_1)t, \quad (3.10.2)$$

где I_n – амплитудные гармоники тока статора, кратные основной гармонике (А);

I_m – амплитуды гармоник тока (А), кратные несущей частоте;

I_{nm} – амплитуды комбинационных гармоник тока статора (А);

$\omega_1 = 2\pi f_1$ – частота вращения основной гармонике тока (рад/с);

$\omega_n = 2\pi f_n$ – частота вращения несущей гармонике тока статора (рад/с);

$m = 1, 2, 3 \dots$ и $n = 1, 5, 7 \dots$ – кратности несущей ω_n и основной ω_1 частот вращения;

f_1, f_n – основная и несущая частоты (Гц).

По результатам анализа статистических данных по нарушению работоспособности электропривода по причине неисправностей асинхронного двигателя были выявлены основные виды дефектов, в части износа подшипников, эксцентриситета воздушного зазора, межвитковых замыканий и обрыва стержней ротора [94, 95, 97], описываемыми гармоническими составляющими тока (3.10.3).

$$\begin{cases} i_{d1}(t) = I_r \sin(\omega_1(1 \pm 2ks)t), \\ i_{d2}(t) = I_{d.st} \sin(\omega_1 \left[\frac{n}{p}(1-s) \pm k \right] t), \\ i_{d3}(t) = I_b \sin \omega_r t, \\ i_{d4}(t) = I_{ec} \sin(\omega_1 \left[r_s \frac{1-s}{p} \pm n \right] t \pm \omega_1 \left[\frac{1-s}{p} \right] t), \end{cases} \quad (3.10.3)$$

где $I_r, I_{d.st}, I_b, I_{ec}$ – амплитудные значения тока статора, модулируемые при дефектах ротора, статора, подшипников, и эксцентриситетом воздушного зазора;

$\omega_r = 2\pi f_r$ – частота вращения ротора (рад/с);

s – скольжение асинхронного двигателя (о.е.);

$k = 1, 3, \dots$ – нечетное целое число;

p – число пар полюсов;

r_s – число стержней ротора;

$n = 1, 3 \dots$ – нечетное целое число.

С учетом (3.10.3) ток статора I_{st} при наличии неисправностей в асинхронном двигателе будет определяться выражением (3.10.4).

$$I_{st}(t) = I_n \sin(n\omega_1 t + \varphi) + \sum_{m=1}^{m=\infty} I_m \sin(m\omega_n t) + \sum_{m=1}^{m=\infty} \sum_{n=1}^{n=\infty} I_{nm} \sin(m\omega_n \pm \pm n\omega_1)t + \sum_{di=1}^{di=\infty} I_{di} \sin(\omega_{di}t), \quad (3.10.4)$$

где I_{di} – амплитудные значения тока статора (А), соответствующее дефекту;

$\omega_{di} = 2\pi f_{di}$ – частота вращения гармонической составляющей тока статора, вызванной дефектом (рад/с);

f_{di} – частота дефекта (Гц).

При этом коэффициент гармонических искажений тока с учетом (3.10.1), (3.10.3) и (3.10.4) представим в виде двух составляющих (3.10.5).

$$K_I = I_{1p}/I = K_{I(n)} + K_{I^*}, \quad (3.10.5)$$

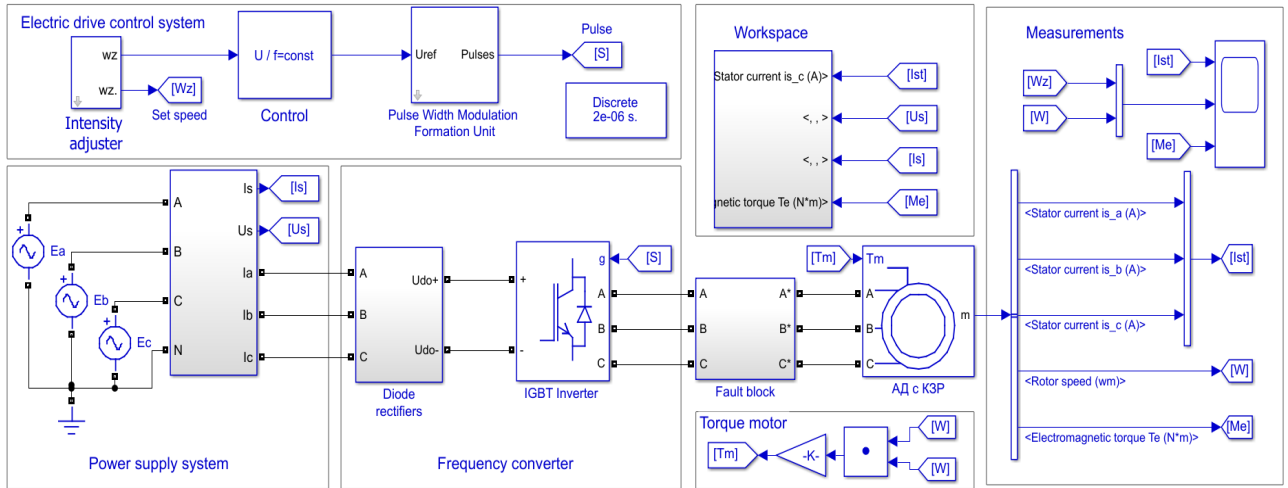
где $K_{I(n)}$ – коэффициент гармонических искажений тока, определяемый типом и структурой силового преобразователя;

K_{I^*} – коэффициент гармонических искажений тока, определяемый дефектами электропривода.

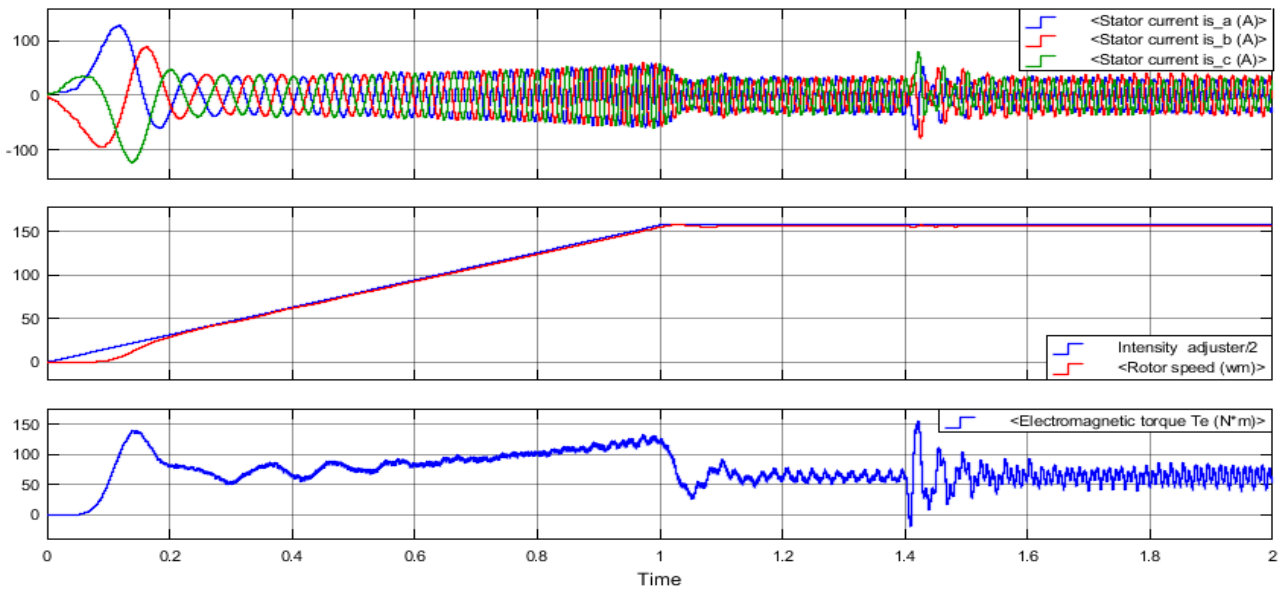
Согласно наиболее распространенной структуре электропривода на объектах добычи нефти и математическому аппарату, описанному выше, была разработана модель электропривода с асинхронным двигателем и двухзвенным преобразователем частоты (Рисунок 3.10.1), используя пакет *MATLAB Simulink*, позволяющая исследовать область работоспособности электропривода.

Графики (Рисунок 3.10.2) изменения коэффициента гармонических искажений K_I и коэффициента пульсаций электромагнитного момента $\sum K_p$ асинхронного двигателя.

Соответственно область работоспособности задается требованиями производителя к уровню коэффициента гармонических искажений K_I (<5%) и коэффициента пульсаций электромагнитного момента $\sum K_p$ (<20%) при частотном регулировании, как функция трех переменных $f(\omega_r, K_I, \sum K_p)$ (Рисунок 3.10.3). Координаты, выходящие за область, соответствуют частичной или полной неработоспособности электропривода.

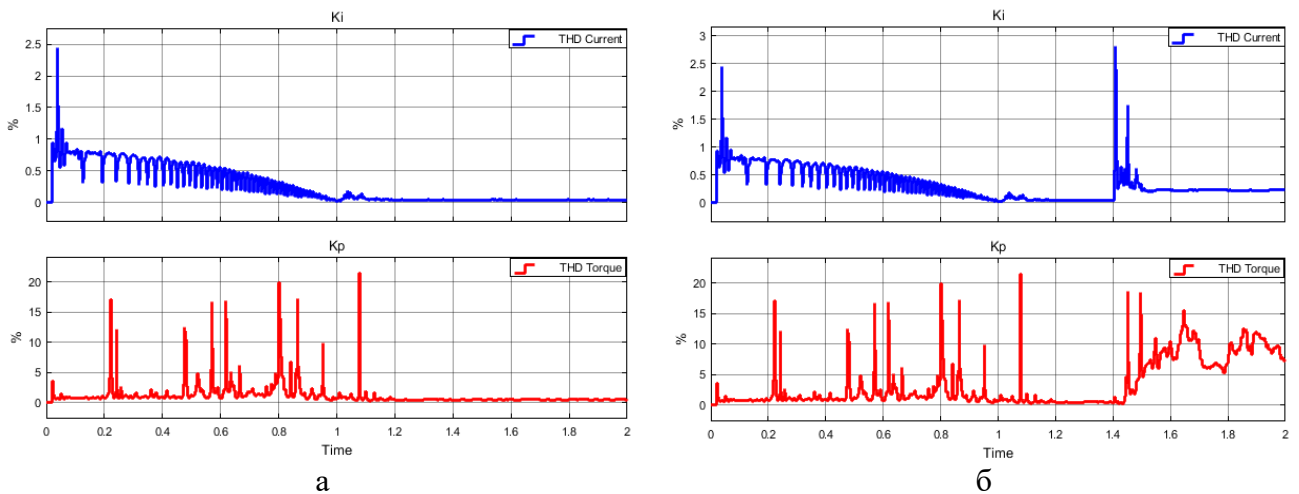


а



б

Рисунок 3.10.1 – а – модель электропривода с асинхронным двигателем и двухзвенным преобразователем частоты; б – осциллограммы выходных координат электродвигателя



а

б

Рисунок 3.10.2 – Изменение коэффициента гармонических искажений K_I и коэффициента пульсаций электромагнитного момента $\sum K_p$ асинхронного двигателя: а – в нормальном состоянии; б – с межфазным замыканием обмотки статора в момент времени $t=1.4$ с

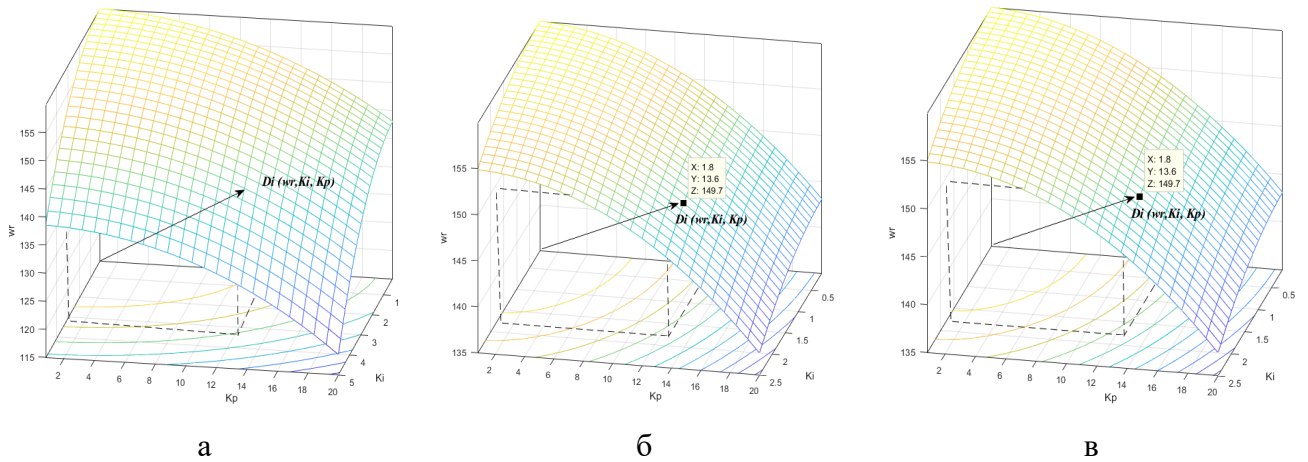


Рисунок 3.10.3 – Области работоспособности электропривода: а – расчетная предельно допустимая; б – при нормальной работе; в – с дефектом обмотки статора

В соответствии с областью работоспособности оценивается уровень безопасной эксплуатации.

3.11 Алгоритм поиска дефектов подшипников

Влияние выхода из строя подшипников оказывает наиболее интенсивное искажение магнитного поля в воздушном зазоре [225]. Этот тип дефекта имеет повышенную скорость развития, что приводит к быстрой деградации механических и связанных с ними электрических частей двигателя [214].

Согласно паспорту двигателя двигатель АИР132М4 оснащен радиальными шарикоподшипниками серии 6208 со следующими техническими характеристиками (Рисунок 3.11.1, Таблица 3.11.1).



Рисунок 3.11.1 – Подшипники шариковые серии – 6208: а – общий вид; б – эскиз размера изделия

Согласно рисунку 3.11.1 подшипник 6208 имеет следующие размеры (Таблица 3.11.1).

Таблица 3.11.1 – Характеристики подшипника

Подшипник	d , мм	D , мм	B , мм	$d1$, мм	$D2$, мм	$r1, r2$, мм
6208	40	80	18	52.6	69.8	min. 1.1

Примечание: d – внутренний диаметр, мм; D – наружный диаметр, мм; B – Ширина, мм; $d1$ – диаметр внутреннего кольца, мм; $D2$ – диаметр наружного кольца, мм; $r1, r2$ – Размер фаски наружного кольца, мм

Эксперимент проводился на четырех состояниях машины:

- эталонная работа двигателя без нагрузки на холостом ходу;
- работа двигателя в нормальных условиях при номинальной нагрузке;
- работа двигателя с одним вкладышем во внутреннем кольце подшипника;
- работа двигателя с тремя вкладышами во внутреннем кольце подшипника.

Результаты (Рисунок 3.11.2 - Рисунок 3.11.5), полученные в ходе эксперимента.

Визуальная оценка фигуры годографов (Рисунок 3.11.2 - Рисунок 3.11.5), позволяет утверждать, что вектор Парка меняет свое состояние в зависимости от рассматриваемых случаев. Ниже приведены дополнительные доказательства целесообразности использования вектора Парка.

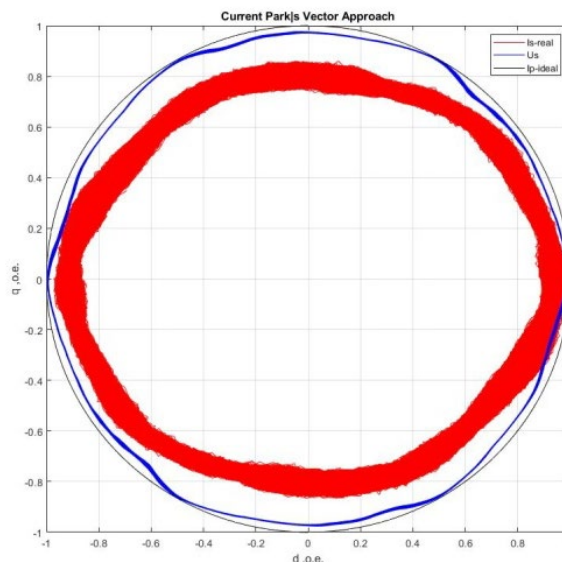


Рисунок 3.11.2 – Эталонная работа двигателя без нагрузки на холостом ходу

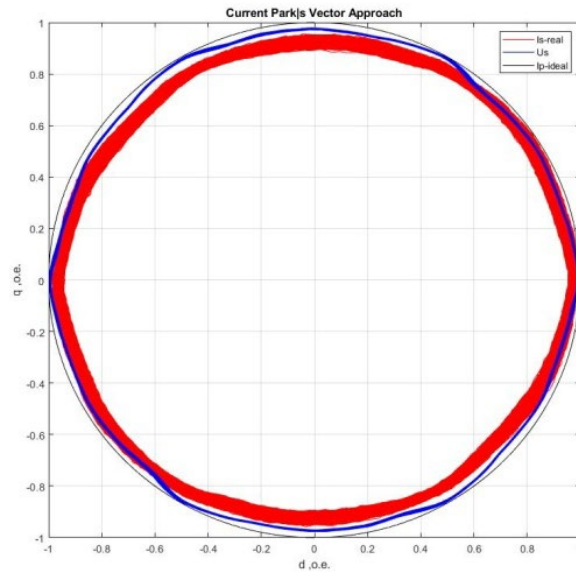


Рисунок 3.11.3 – Работа двигателя в стандартных условиях при номинальной нагрузке

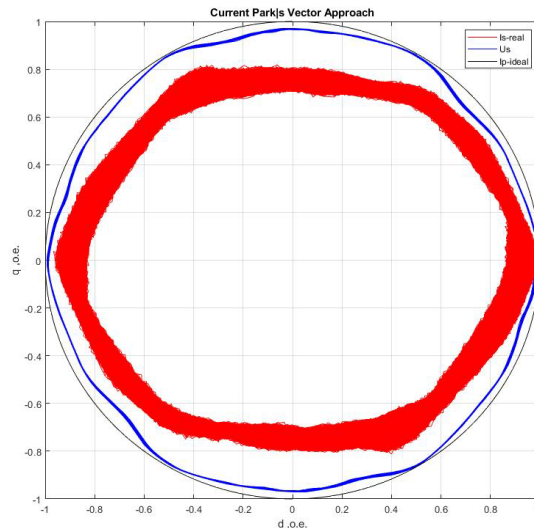


Рисунок 3.11.4 – Работа двигателя с одним вкладышем во внутреннем кольце подшипника

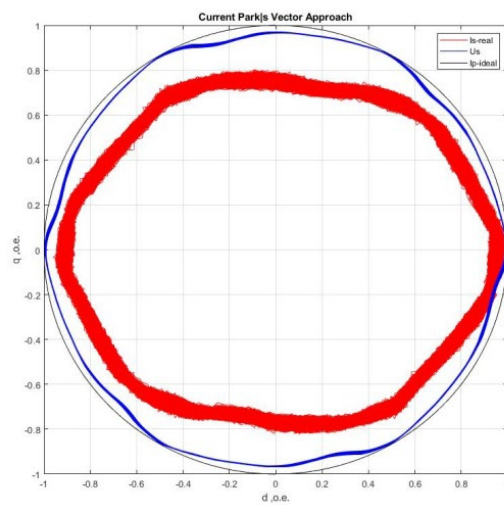


Рисунок 3.11.5 – Работа двигателя с тремя вкладышами во внутреннем кольце подшипника

В работах [217] по спектральному анализу тока потребления электродвигателя выделены характерные частоты, по которым можно определить наличие дефекта (3.11.1). Начальной стадией износа подшипника является залегание деталей контакта с телами качения, а именно шариками, на внутреннем или наружном кольце.

$$f_{rb} = \frac{n}{2} \times f_{rm} \times [1 \pm (\frac{D_{ball}}{D_{pit}} \times \cos\beta)], \quad (3.11.1)$$

где f_{rm} – частота вращения ротора;

n – количество шариков в подшипнике;

β – контактный угол;

D_{pit} – диаметр окружности центров шаров;

D_{ball} – диаметр шара.

По сравнению со спектральным анализом на БПФ [193], где часть информации теряется из-за использования фильтров нижних и верхних частот и в шумовой области (-75-80 дБ), практически невозможно обнаружить начальные этапы дефекта. Возникновение дефекта (в нашем случае дефекта подшипника) в годографе (Рисунок 3.11.6) можно обнаружить раньше по искажению его траектории (Рисунок 3.11.7), чего спектр не позволяет идентифицировать. Ожидаемые расчетные частоты отказов подшипников согласно таблице 3.11.1 при $\cos\beta = 1$ составляют $f_{rb} = 175$ Гц, 256 Гц. Однако из-за визуальной идентификации неисправностей на годографе искажения траектории построить систему оценки уровня неисправностей не представляется возможным.

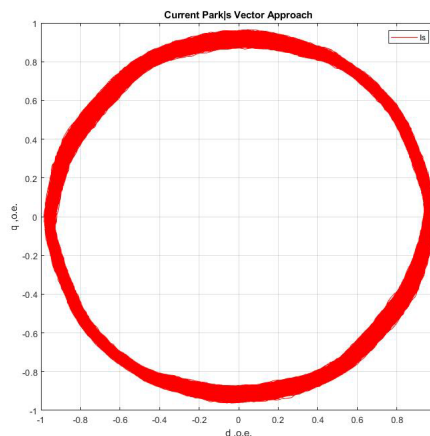


Рисунок 3.11.6 – Годограф при появлении дефекта

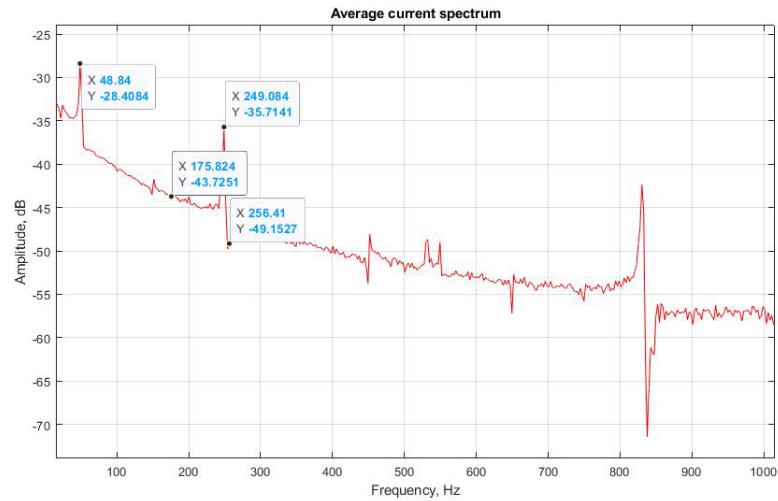


Рисунок 3.11.7 – Спектр при появлении дефекта

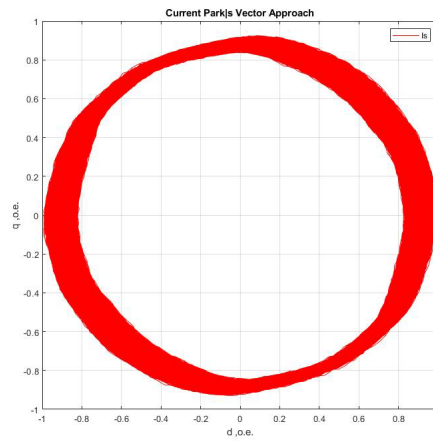


Рисунок 3.11.8 – Годограф при средней стадии дефекта

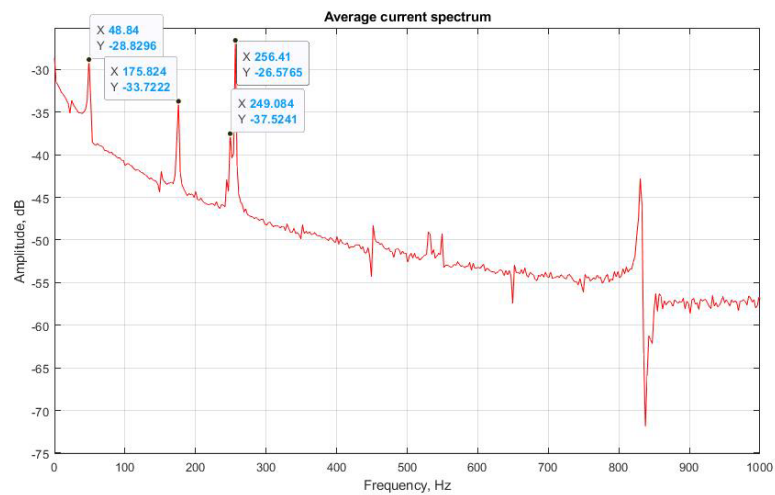


Рисунок 3.11.9 – Спектр при среднем дефекте

Дальнейший анализ метода выявил ряд преимуществ. Во-первых, для обнаружения неисправностей требуются только два датчика тока (датчики тока с компенсацией эффекта Холла), (Рисунок 3.11.10). Ток третьей фазы определяется косвенно [11, 32, 282].

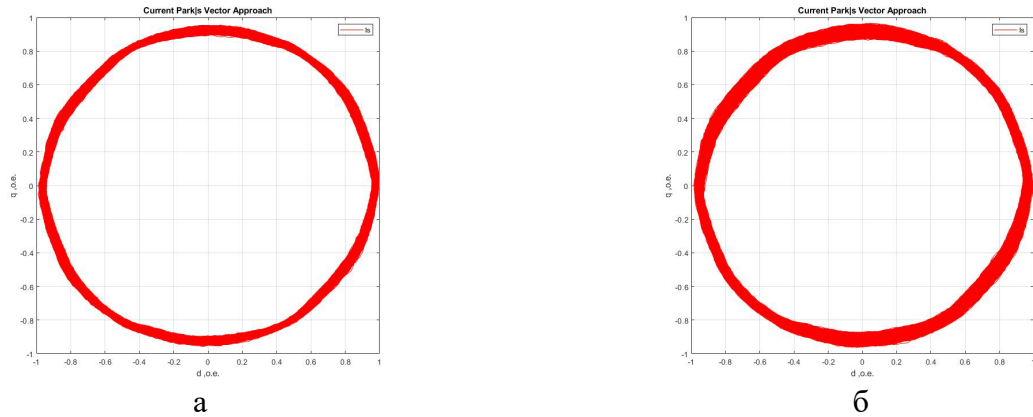


Рисунок 3.11.10 – Годографы тока потребления АД: а – при записи фазных токов А, В, С; б – при записи фазных токов А и С

Второе достигается синхронной регистрацией токов фазных напряжений (U_A , U_B , U_C), что исключает влияние сетевых искажений. Искажения из-за качества сети [197] должны быть взаимно исключены при анализе из годографа асинхронного двигателя (Рисунок 3.11.11).

Результаты обучения классификатора ИНС (Рисунок 3.11.12). Классификатор обучался с использованием трех методов – дерева решений [146], метода опорных векторов [215] и К-ближайших соседей [205].

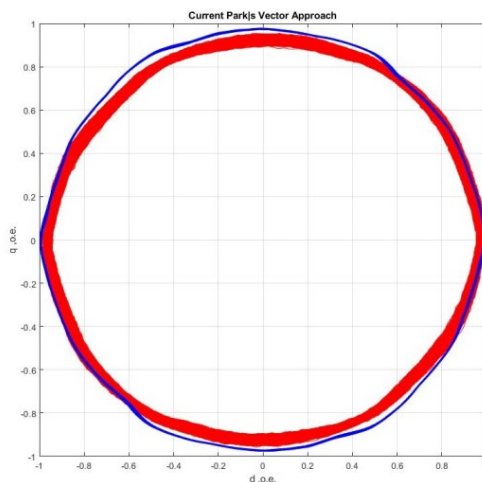


Рисунок 3.11.11 – Потребляемый ток АД (красный) и напряжение питания (синий)

Data Browser		
▼ History		
1 ☆ Tree	Accuracy: 98.2%	100/100 features
Last change: Disabled PCA		
2 ☆ SVM	Accuracy: 99.7%	100/100 features
Last change: Linear SVM		
3 ☆ KNN	Accuracy: 99.8%	100/100 features
Last change: Fine KNN		

Рисунок 3.11.12 – Результат обучения ИНС-классификатора

Как видно из рисунка 3.11.12, лучший метод – K -ближайших соседей с точностью 99,9. Этот хороший результат подтвержден в виде матрицы путаницы (Рисунок 3.11.13).

Тестирование алгоритма классификатора ИНС на реальных данных также дало значительные результаты. Точность составила 98%. Чрезмерно высокая точность результатов обусловлена идеализированными условиями эксперимента. Использование предложенного математического аппарата в режиме реального времени позволяет реализовать программный датчик для выявления различных видов дефектов.

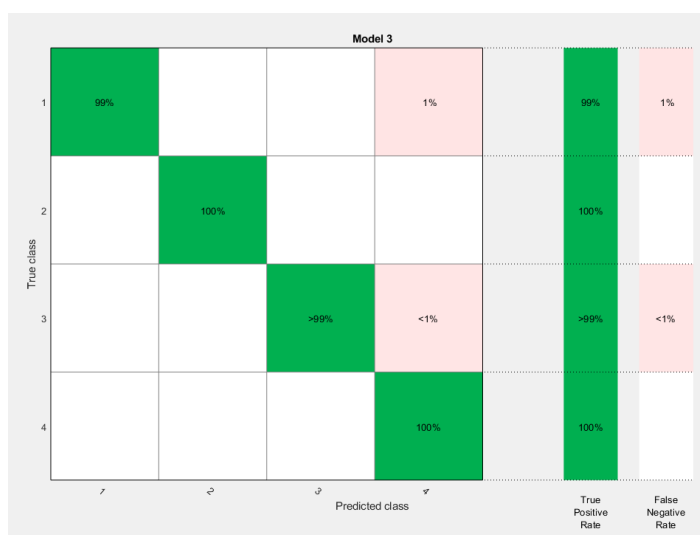


Рисунок 3.11.13 – Результат обучения ИНС-классификатора. Матрица путаницы

3.12 Разработка алгоритма обнаружения повреждений на ранней стадии методом сингулярного разложения тока статора

Несмотря на высокие темпы развития интеллектуальных систем, алгоритмы обнаружения неисправности и повышенного энергопотребления для

электрических машин часто сталкиваются с рядом ограничений, таких как отсутствие доступа к историческим данным или качественное определение наличия, и более того – вида дефекта. Поэтому становится актуальной задача поиска и разработки методов, не требующих дополнительных знаний о состоянии ЭМО.

Данный подход актуален в тех случаях, когда математически описать изучаемый процесс не представляется возможным, но в исследуемом сигнале имеется некоторая характерная наблюдаемая величина, связанная с происходящими процессами. В случае идентификации дефекта асинхронного двигателя по току статора, задача сводится к разложению сигнала на сумму подсигналов и к извлечению из сигнала тока статора составляющей (компоненты), отвечающей за искажение сигнала АД.

Целесообразно рассмотреть методы, не требующие доступа к историческим данным и дополнительным сведениям о текущем состоянии ЭМО. Тогда электрический сигнал тока статора рассматривается с точки зрения временного ряда, и, таким образом, переходим к задаче исследования и разложения временных рядов.

Рассмотрим подход, основанный на сингулярном спектральном анализе (*Singular Spectrum Analysis, SSA*), в ядре которого лежит сингулярное разложение исходной выборки (*Singular Value Decomposition, SVD*). Аппарат сингулярного анализа основан на разложении временного ряда на простейшие аддитивные составляющие, что позволяет учесть и исследовать его структуру [109, 247]. Подход не требует дополнительных сведений о стационарности ряда, его свойствах, а также знания о наличии в ряде гармонических и циклических составляющих [1, 275]. Он нашел свое применение во многих областях и в последнее время широко применяется в анализе сигналов механических систем, включая анализ сигнала вибрации для диагностики неисправностей подшипников, дефектов ротора [142, 154, 223, 224, 252, 325]. Тем не менее, на данный момент не обнаружено работ, посвященных исследованию сигнала тока статора асинхронного двигателя с помощью сингулярного анализа. Поэтому предлагается использовать

метод сингулярного разложения исходной выборки применительно к сигналу тока статора электродвигателя для выявления паттернов, характеризующих возникновение и развитие дефекта подшипника. Предлагаемый алгоритм, основанный на сингулярном разложении, может применяться для обнаружения компонент, связанных с дефектом, сглаживания временного ряда, для исследования изменения при деградации подшипника и развитии дефектов, обусловленных его износом.

Для апробации предложенного метода выбран дефект подшипника. Процедура эксперимента заключается в искусственном разрушении внутренних колец подшипника в виде ряда оболочек разрушения, вызванных трением, в шарикоподшипнике с глубоким пазом.

Сбор данных сигналов тока для дальнейшего анализа проводился на базе лабораторий Образовательного центра цифровых технологий Санкт-Петербургского горного университета. Процедура проведения эксперимента являлась необходимой ввиду недоступности натуральных производственных данных и отсутствия подобных датасетов в открытом доступе в сети Интернет. Для проведения исследований и подтверждения гипотез о возможности раннего обнаружения повреждения подшипника применялась высокочастотная оцифровка аналогового с частотой дискретизации 10 кГц.

В экспериментах исследовался асинхронный двигатель АИР132М4 (Таблица 3.12.1), $P_{ном} = 11$ кВт, с питанием от сети частотой 50 Гц в непрерывном режиме работы и постоянной нагрузкой на валу в процессе эксперимента.

Таблица 3.12.1 – Паспортные данные асинхронного двигателя

Двигатель	$P_{ном}$, кВт	$I_{ном}$, А	n , об/мин	$\cos \varphi$	η_m , %	λ	K_p	K_i
АИР132М4	11,00	23,40	1450	0,82	87,1	2,3	2,2	6,8

Примечание: $P_{ном}$ – номинальная мощность; $I_{ном}$ – номинальный ток статора, А; n – скорость вращения; η_m – коэффициент полезного действия; $\cos \varphi$ – коэффициент мощности; λ – перегрузочная способность; K_p – кратность пускового момента; K_i – кратность пускового тока.

Внешний вид и схема подключения АД (Рисунок 3.12.1). Постоянная нагрузка осуществляется с помощью электромагнитного тормоза. Сбор данных высокой частоты дискретизации реализован с помощью универсального шасси *NI PXI-1042* и многофункционального модуля ввода-вывода *PXI-6215*.

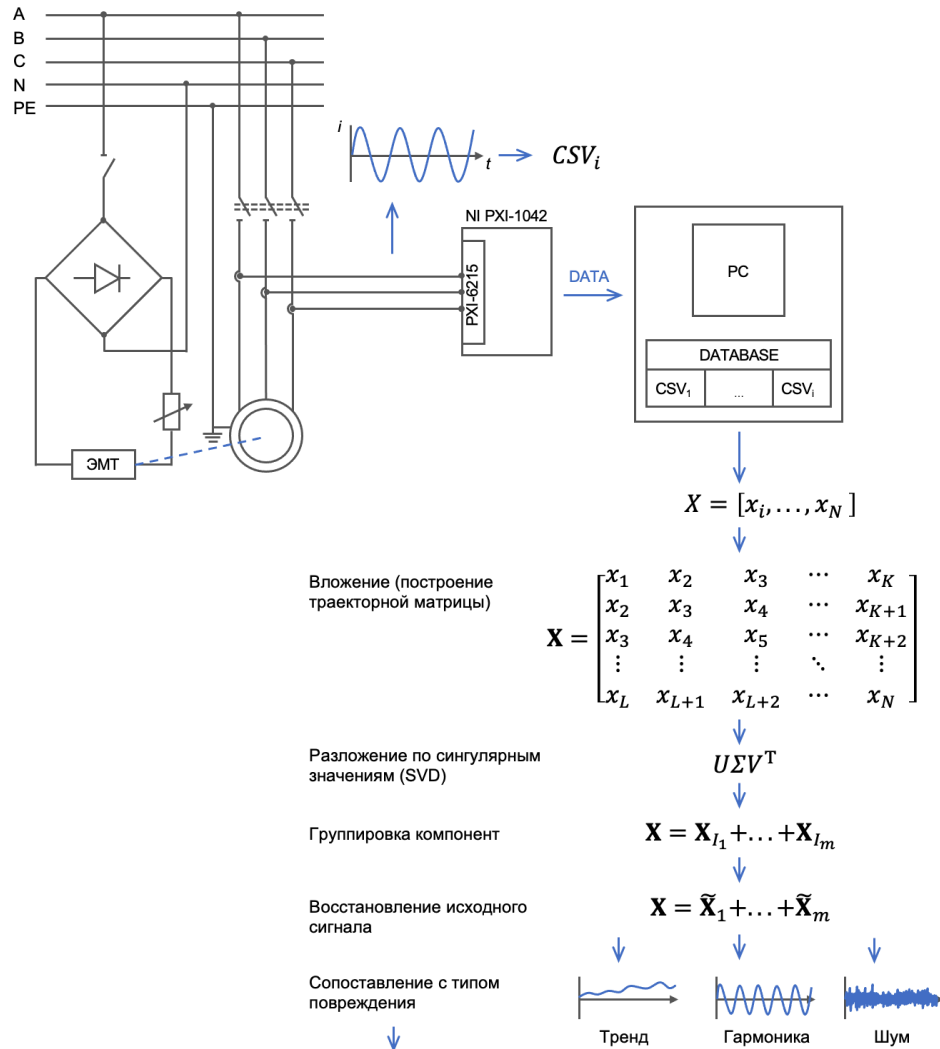


Рисунок 3.12.1 – Общая схема исследования включая алгоритм *SSA*

Как видно из осциллограмм, наличие дефекта с одной раковинкой не вносит искажений в ток и напряжение, дальнейшее развитие дефекта проявляется в искажении тока, однако на напряжении это не проявляется (Рисунок 3.12.3).

Эксперимент проводился в трёх состояниях машины:

- работа исправного двигателя в стандартных условиях при номинальной нагрузке;
- работа двигателя с одной раковинкой во внутреннем кольце подшипника при номинальной нагрузке;

– работа двигателя с тремя раковинами во внутреннем кольце подшипника при номинальной нагрузке.

В качестве экспериментальных данных используются три временных ряда потребления тока и напряжения двигателем: первый набор данных – без дефектов, два набора имеют 1 или 3 дефекта одного типа соответственно (раковины во внутреннем кольце подшипника) на заднем подшипниковом щите. Данные временные ряды имеют одинаковую синусоидальную структуру, однако присутствуют незначительные искажения, природа которых визуально неопределима (Рисунок 3.12.2).

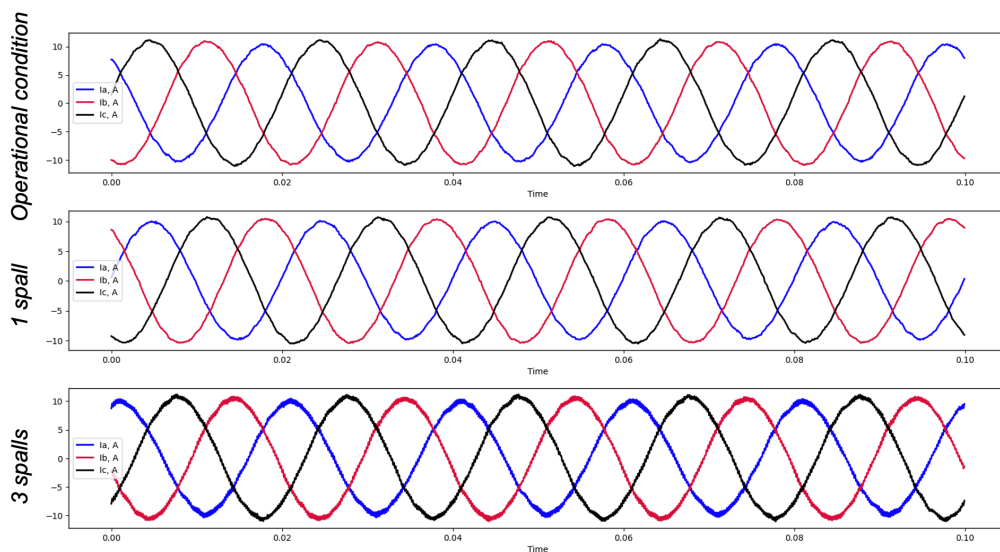


Рисунок 3.12.2 – Сигналы тока для исправного подшипника, подшипника с одной раковиной, подшипника с тремя раковинами

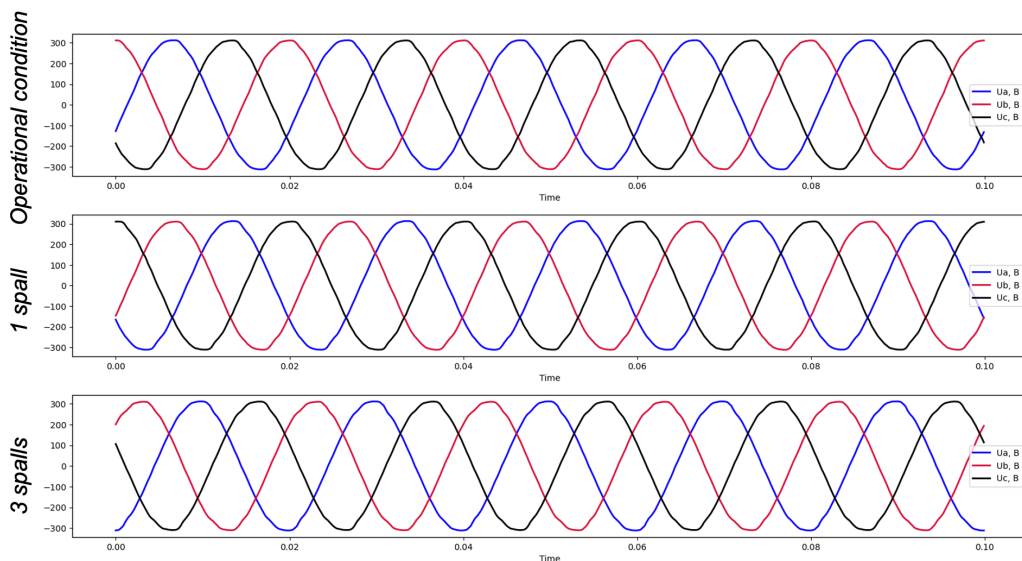


Рисунок 3.12.3 – Сигналы напряжения для исправного подшипника, подшипника с одной раковиной, подшипника с тремя раковинами

В этом случае следует использовать временные ряды напряжения для выявления данных искажений и исключения их влияния на результат обнаружения повреждения.

Метод *SSA* состоит в преобразовании одномерного ряда в многомерный с помощью:

- 1) однопараметрической сдвиговой процедуры;
- 2) исследовании полученной многомерной траектории с помощью анализа главных компонент (сингулярного разложения);
- 3) процедуры группировки;
- 4) восстановлении (аппроксимации) ряда по выбранным главным компонентам.

Полученные в результате разложения компоненты и их изменения сопоставляются с состояниями подшипника. Рассмотрим более подробно каждый из этапов.

1. Вложение (построение траекторной матрицы)

Сигналы тока фаз АД, записанные в файл при определенном режиме нагрузки и уровне дефекта преобразовывались в вектор X , представляющий собой упорядоченный набор N мгновенных значений тока. Затем осуществляется процедура вложения, которая представляет из себя преобразование исходного одномерного ряда $X = [x_1, \dots, x_N]$ длины N в последовательность L -мерных векторов, число которых равно $K = N - L + 1$; L – длина окна, $1 < L < N$ (3.12.1).

$$X_i = (x_{i-1}, \dots, x_{i+L-1})^T, 1 \leq i \leq K \quad (3.12.1)$$

Данные вектора образуют траекторную матрицу $\mathbf{X} = [X_1 : \dots : X_K]$ исходного временного ряда, которая является Ганкелевой и имеет одинаковые элементы на диагонали $i + j = \text{const}$ (3.12.2).

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & \dots & x_K \\ x_2 & x_3 & x_4 & \dots & x_{K+1} \\ x_3 & x_4 & x_5 & \dots & x_{K+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_L & x_{L+1} & x_{L+2} & \dots & x_N \end{bmatrix} \quad (3.12.2)$$

2. Разложение (*Singular value decomposition*)

Сингулярным разложением для матрицы $A \in R^{m \times n}$ является разложение следующего вида (3.12.3).

$$A = U\Sigma V^T, \quad (3.12.3)$$

где $U = (u_1, u_2, \dots, u_m) \in R^{m \times m}$ – унитарная матрица левых сингулярных векторов;

$V = (v_1, v_2, \dots, v_n) \in R^{n \times n}$ – унитарная матрица правых сингулярных векторов;

Σ – диагональная матрица размером $m \times n$, диагональные элементы которой – неотрицательные значения сингулярных чисел матрицы A в порядке убывания, $\Sigma = [diag(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m), 0] \in R^{m \times n}$, $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots, \sigma_m > 0$.

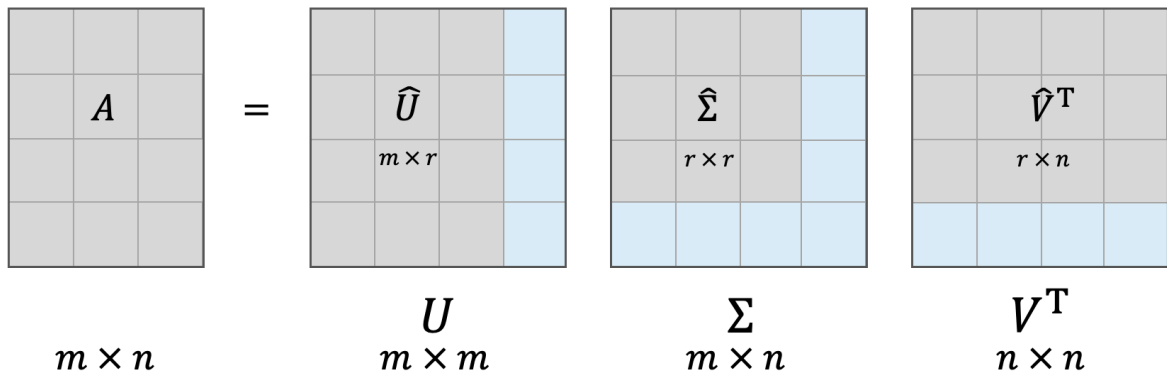


Рисунок 3.12.4 – Схематическое изображение SVD.

Матрица A также может быть представлена в виде суммы подматриц (3.12.4).

$$A = \begin{bmatrix} | & | & \dots & | \\ u_1 & u_2 & \dots & u_r \\ | & | & \dots & | \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_r \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} - & v_1^T & - \\ - & v_2^T & - \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ - & v_r^T & - \end{bmatrix} = \sigma_1 u_1 v_1^T +$$

$$+ \sigma_2 u_2 v_2^T + \dots + \sigma_m u_m v_m^T = \sum_{i=1}^r A_i, \quad (3.12.4)$$

где $r = \min(m, n)$ – ранг матрицы A ; соответственно;

$A_i = \sigma_i u_i v_i^T$, ($i = 1, 2, \dots, r$) – подматрица i -го подсигнала.

Для разложения полученной на предыдущем шаге траекторной матрицы X рассмотрим матрицу $S = XX^T$, собственные числа которой $\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_L \geq 0$ неотрицательны и взяты в порядке убывания. Обозначим $d = \text{rank } X = \max\{j : \lambda_j > 0\}$, U_1, \dots, U_L – соответствующие собственные вектора матрицы S , $V_j = X^T U_j / \sqrt{\lambda_j}$, $j = 1, \dots, d$ – факторные вектора.

Тогда разложение траекторной матрицы может быть записано следующим образом (3.12.5).

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_1 + \dots + \mathbf{X}_d, \quad \mathbf{X}_j = \sqrt{\lambda_j} U_j V_j^T, \quad (3.12.5)$$

где $(\sqrt{\lambda_j} U_j V_j^T)$ – j -ая собственная тройка сингулярного разложения, содержащая сингулярное значение $\sigma_j = \sqrt{\lambda_j}$, левый сингулярный вектор U_j и правый сингулярный вектор V_j траекторной матрицы \mathbf{X} .

В результате применения метода SVD, мы получим (3.12.6).

$$\mathbf{X} = \sum_i \mathbf{X}_i, \quad \mathbf{X}_i = \sigma_i U_i V_i^T. \quad (3.12.6)$$

Для того, чтобы предварительно оценить структуру компонент, необходима визуализация разложенной траекторной матрицы на составляющие. Пример такой визуализации для сигнала фазы А (Рисунок 3.12.5). Обобщённые результаты разложения для всех фаз (Рисунок 3.12.6).

Первые 12 компонент (Рисунок 3.12.6) исходного ряда в виде ганкелиризованных элементарных матриц, расположенных в порядке убывания их вклада в реконструируемый временной ряд. Практические рекомендации относительно количества рассматриваемых компонент для анализа повреждения в литературе отсутствуют.

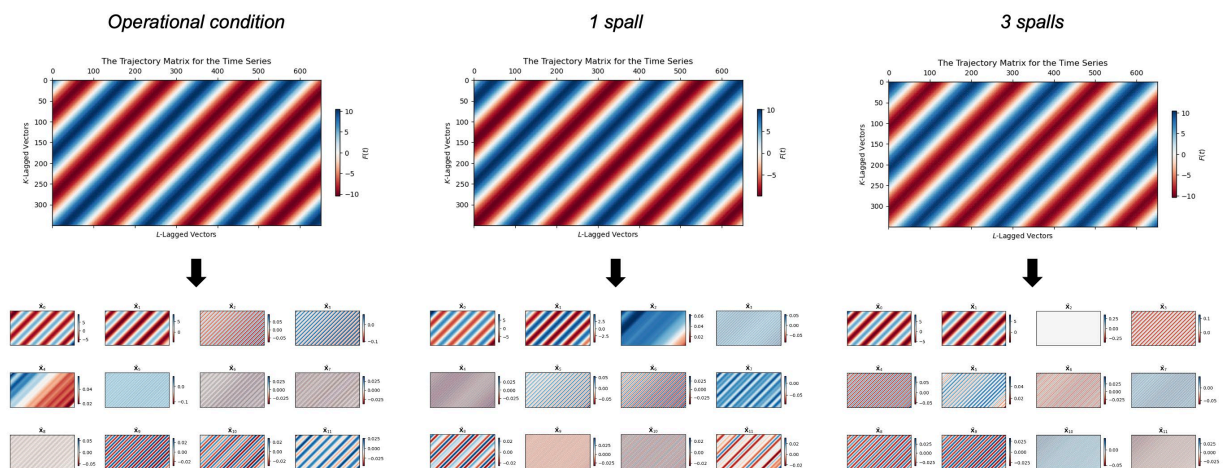


Рисунок 3.12.5 – Построение траекторных матриц для фазы А и их разложение на 12 компонент для исправного подшипника, подшипника с одной раковинной, подшипника с тремя раковинами

В качестве обоснования рассмотрения не более 12-ти компонент из 350-ти сингулярных значений, используемых при разложении, можно использовать количество видов возможных факторов, формирующих сигнал тока. К факторам,

влияющим на сигнал тока, помимо конструктивных особенностей двигателя и нагрузки, можно отнести наличие дефектов. Следовательно, количество возможных дефектов является граничным для рассмотрения в качестве значимых компонент. К повреждениям, которые возможно определить по электрическим сигналам, относятся следующие: выход из строя подшипников, несоосность валов, межфазное замыкание, эксцентриситет, обрыв стержней ротора.

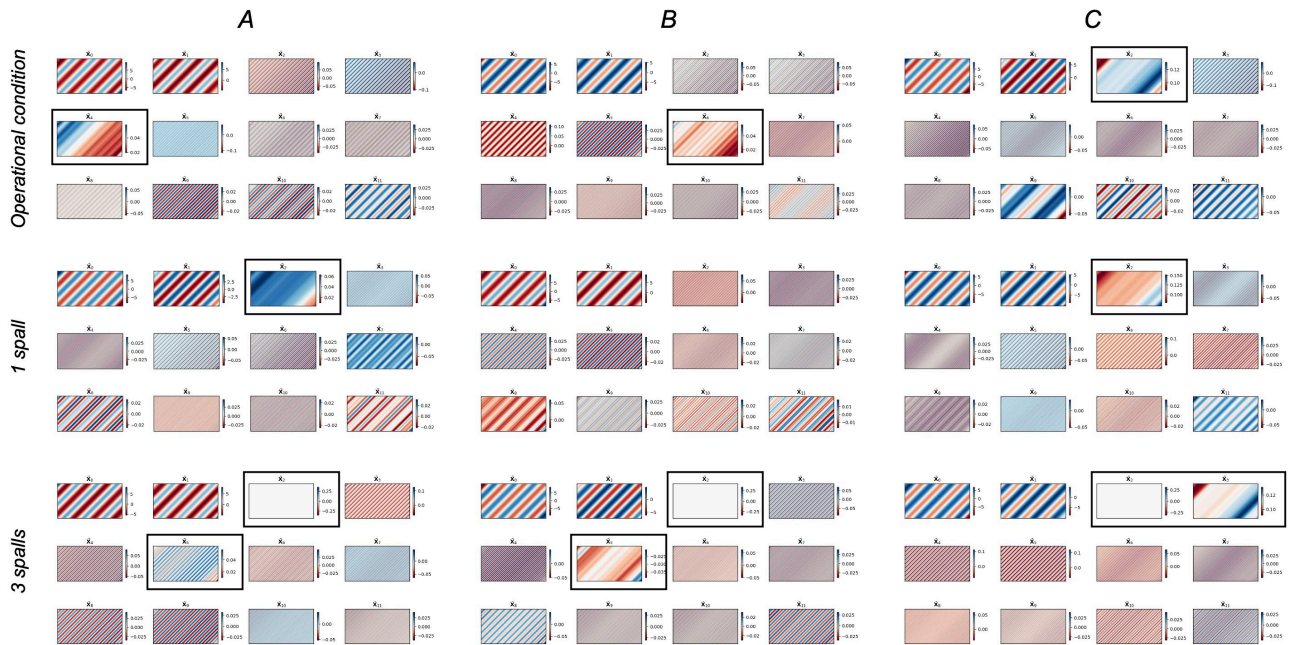


Рисунок 3.12.6 – Сопоставление разложения траекторных матриц всех рассматриваемых сигналов

Визуально определимо характерное изменение некоторых компонент, которые выделены (Рисунок 3.12.6). При появлении и увеличении дефекта нестационарная компонента увеличивает свой вклад в общую структуру сигнала, что приводит к увеличению её порядкового номера. Необходимо отметить, что при наличии 3-х раковин, то есть явного проявления дефекта, во всех фазах появляется вырожденная компонента $\tilde{X}_2: \det(\tilde{X}_2) \rightarrow 0$.

Оценка относительного вклада компонент в траекторную матрицу, а также кумулятивный вклад рассчитываются по выражениям (3.12.7).

$$RC_i = \frac{\sigma_i^2}{\sum_{k=0}^{d-1} \sigma_k^2}, \quad \sum_{i=0}^i RC_i = \frac{\sum_{j=0}^i \sigma_j^2}{\sum_{k=0}^{d-1} \sigma_k^2}. \quad (3.12.7)$$

Графики (Рисунок 3.12.7) изображают относительный и кумулятивный вклад первых 12 компонент. Ввиду значительного вклада первых двух компонент

графики представлены попарно: верхние графики в каждом из режимов включают все компоненты, а последующие (нижние) исключают первые две компоненты для более наглядного представления.

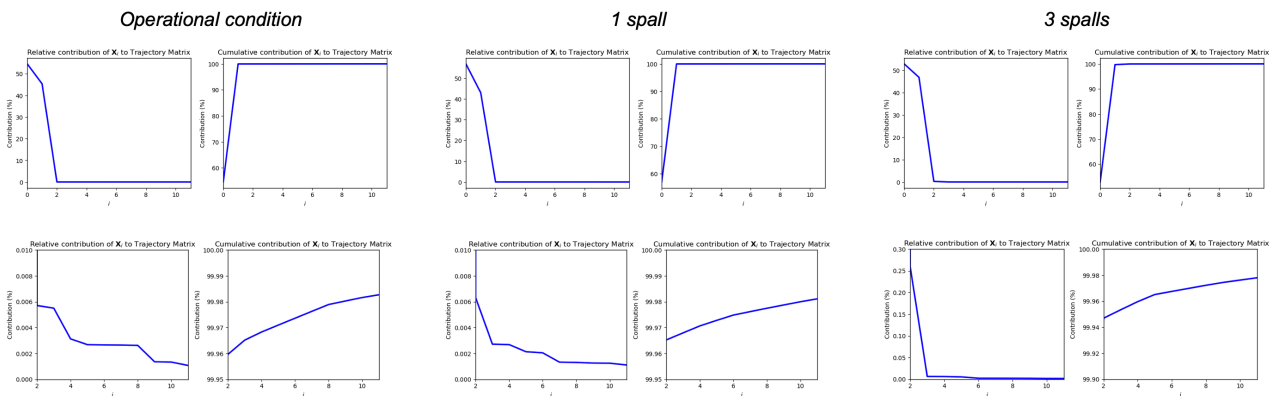


Рисунок 3.12.7 – Относительный и кумулятивный вклад компонент: [0..11] (вверху), [2..11] (внизу) для фазы А исправного подшипника, подшипника с одной раковинной, подшипника с тремя раковинами

Полный результат расчёта вклада компонент (Таблица А.4).

3. Группировка компонент

Пусть $I = \{i_1, \dots, i_p\} \subset \{1, \dots, d\}$, тогда результирующая матрица \mathbf{X}_I , соответствующая группе I , определяется как $\mathbf{X}_I = \mathbf{X}_{i_1} + \dots + \mathbf{X}_{i_p}$. Процедура группировки разбивает всё множество индексов $\{1, \dots, d\}$ на m непересекающихся подмножеств I_1, \dots, I_m . Тогда разложение может быть записано в виде (3.12.8).

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_{I_1} + \dots + \mathbf{X}_{I_m}. \quad (3.12.8)$$

Процедура выбора подмножеств I_1, \dots, I_m является процедурой группировки собственных троек.

Этап процедуры группировки может выполняться на основе целого ряда подходов, в рассматриваемой методике ввиду слабой визуальной делимости компонент, для проверки гипотез группировки компонент на основе визуального сравнения траекторных матриц рассматривается группировка на основе матрицы W -корреляции.

Матрица W -корреляции предназначена для проверки и количественного отражения степени делимости между элементарными компонентами. Анализ корреляционной матрицы позволяет определить пары коррелирующих компонент

и сгруппировать их. Тогда мера разделимости между двумя восстановленными временными рядами \tilde{F}_i и \tilde{F}_j будет определяться следующим образом (3.12.9).

$$W_{ij} = \frac{(\tilde{F}_i, \tilde{F}_j)_w}{\|\tilde{F}_i\|_w \|\tilde{F}_j\|_w}, \quad (3.12.9)$$

где $(\tilde{F}_i, \tilde{F}_j)_w$ – взвешенное скалярное произведение, $(\tilde{F}_i, \tilde{F}_j)_w = \sum_{k=0}^{N-1} w_k \tilde{f}_{i,k} \tilde{f}_{j,k}$; $\tilde{f}_{i,k}, \tilde{f}_{j,k}$ – k -е значения \tilde{F}_i и \tilde{F}_j соответственно; $w_k = \min\{k, L, N - k + 1\}$; $\|\tilde{F}_k\|_w = \sqrt{(\tilde{F}_k, \tilde{F}_k)_w}$ для $k = i, j$.

Чем меньше значение W_{ij} , тем выше разделимость компонент; соответственно, если восстановленные \tilde{F}_i и \tilde{F}_j близки друг к другу, то $(\tilde{F}_i, \tilde{F}_j)_w \rightarrow \|\tilde{F}_i\|_w \|\tilde{F}_j\|_w$, а $W_{ij} \rightarrow 1$. $W_{ij} = 0$, если \tilde{F}_i и \tilde{F}_j ортогональны. Данная метрика необходима для определения схожести результирующих матриц, при выполнении иерархической кластеризации, в ходе автоматической группировки компонент: $d(i, j) = 1 - |W_{ij}|$.

Метод на основе иерархической кластеризации заключается в последовательной группировке схожих пар на основе расстояний; объединение продолжается до тех пор, пока все объекты не будут составлять один кластер. В результате строится дерево групп, называемое дендограммой, изображающей взаимные связи между объектами из заданного множества. Количество групп зависит от порогового значения; чем выше порог (ось Y), тем меньшее число групп будет на выходе.

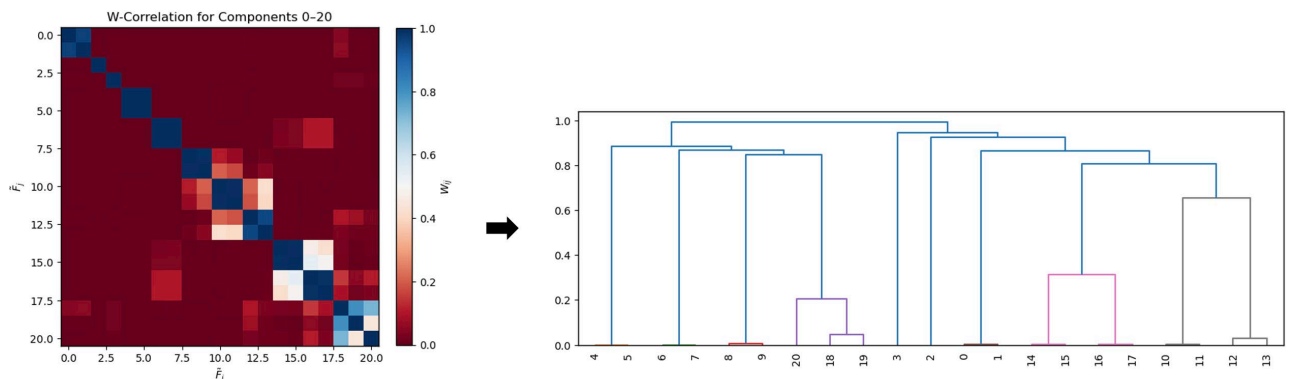


Рисунок 3.12.8 – Схема выполнения алгоритма группировки компонент

Результаты группировки (Таблица А.4) методом иерархической кластеризации, а также сравнение с группировкой на основе скаттерограмм и визуальной группировкой на основе ганкелевых матриц.

4. Реконструкция исходного сигнала

На заключительном этапе алгоритма каждая из матриц \mathbf{X}_{I_m} из разложенных (3.12.8) преобразуется обратно в форму исходного объекта X . Эта операция осуществляется с помощью ганкелизации матриц (диагонального усреднения). На выходе получим ближайшую матрицу относительно нормы Фробениуса, которая соблюдает свойства Ганкелевой матрицы и сохраняет размер.

Пусть $\mathbf{Y} \in \mathbb{R}^{L \times K}$, $1 \leq i \leq L$, $1 \leq j \leq K$. Обычно $L < K$, но для общности примем $L^* = \min(L, K)$, $K^* = \max(L, K)$ и $N = L + K - 1$. Пусть $y^*_{ij} = y_{ij}$ при $L < K$ и $y^*_{ij} = y_{ji}$ в остальных случаях. Пусть $s = i + j$, тогда формула диагонального усреднения для матрицы \mathbf{Y} примет вид (3.12.10).

$$\tilde{y}_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{s-1} \sum_{l=1}^{s-1} y^*_{l,s-l} & \text{for } 2 \leq s \leq L^*, \\ \frac{1}{L^*} \sum_{l=1}^{L^*} y^*_{l,s-l} & \text{for } L^* \leq s \leq K^* + 1, \\ \frac{1}{N-s+2} \sum_{l=s-K^*}^{L^*} y^*_{l,s-l} & \text{for } K^* + 2 \leq s \leq N + 1. \end{cases} \quad (3.12.10)$$

Диагональное усреднение, примененное к каждой результирующей матрице компонент, создает восстановленные временные ряды. Таким образом, исходный ряд раскладывается в сумму восстановленных рядов.

На основании представленного алгоритма разложения и группировки компонент были обработаны сигналы тока трёх фаз асинхронного двигателя в рассматриваемых режимах работы.

Результаты оценки показывают, что 12 первых сингулярных значений описывают 99,98% всей информации исходного сигнала во всех трёх режимах, следовательно, существенная потеря информативности исключается. Кроме того, определение количества информативных составляющих возможно по матрицам сходства главных компонент, рассчитанных на основе расстояния между парами ганкелевых матриц (3.12.11).

$$\|\mathbf{X}\|_F = \sqrt{\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^K |x_{ij}|^2} \quad (3.12.11)$$

где $\|\mathbf{X}\|_F$ – норма Фробениуса.

Необходимо отметить, что выбор вида нормы является произвольным. Анализируя матрицу расстояний, можно выделить чёткую границу в диапазоне $\tilde{F}_{ij} = [10..20]$, что подтверждает сходство первых компонент и отбрасывает неинформативные компоненты $\tilde{F}_{ij} = [20..350]$.

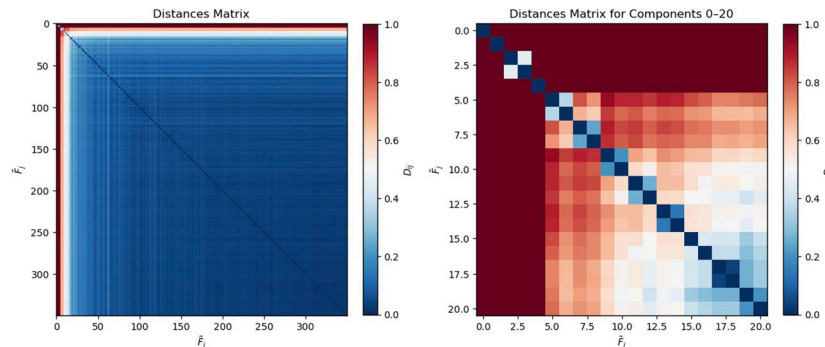


Рисунок 3.12.9 – Матрица расстояний на основе нормы Фробениуса для фазы А исправного подшипника; слева – для полного набора компонент (350), справа – для исследуемого набора информативных компонент (20)

3.13 Переход к предсказательной системе обслуживания и ремонта на основе интеллектуальных алгоритмов и методов

Таким образом представленные исследования показывают, что эффективное использование профилактического обслуживания требует больших объемов данных датчиков, обученных алгоритмов машинного обучения и методов, позволяющих обнаруживать и отслеживать изменения дефектов на ранней стадии развития. Научно-техническая разработка комплекса решений, позволяющих реализовать функциональные свойства ПСТОиР, осуществлялась с ориентацией на использование как электрических параметров, так и сигналов вибрации, температуры, данных технологического процесса. При этом вариации комплекса алгоритмов могут использоваться в независимости от количества ЭМО, специфики и условий работы на ГиНГП. Однако для выполнения этих требований в промышленной среде важную роль играет используемая архитектура построения систем для анализа, особенно в отношении объема, скорости и разнообразия данных, что будет рассмотрено в последующих главах, поскольку датчики и

устройства производят большие объемы данных разных типов, которые должны анализироваться в реальном или почти реальном времени в зависимости от ряда признаков ЭМО. В таблице 3.13.1. показана сравнительная оценка комплекса предложенных алгоритмов.

В таблице 3.13.2 представлены функциональные признаки систем ТОиР, а также сопоставлены разработанные алгоритмы, необходимые для обеспечения перехода к системе предсказательного ТОиР.

Таблица 3.13.1 – Функциональные свойства разработанных алгоритмов для предсказательной системы ТОиР

Название алгоритма	Горизонт прогноза	Определение ранней стадии дефекта	Определение критической стадии дефекта	Прогнозирование остаточного ресурса
Алгоритм поиска частотных составляющих	определен временем дискретизации T_d , являющимся частотой записи матриц U_a , U_b , U_c , I_a , I_b , I_c и временем работы алгоритма (статическое, размер матриц не изменяется)	+	+	-
Алгоритм оценки состояний ЭМО		+	+	-
Разработка программного датчика для обнаружения повреждения подшипника		+	+	-
Разработка алгоритма обнаружения повреждений на ранней стадии методом сингулярного разложения тока статора	определен временем дискретизации T_d , являющимся частотой записи матриц I_a , I_b , I_c и временем работы алгоритма (статическое, размер матриц не изменяется)	+	+	-
Нейросетевые алгоритмы определения группового состояния электропривода в узлах нагрузки		+	+	-
Алгоритм управления режимами на основе нейросетевого диагностирования неисправностей и технического состояния ЭМО	определен частотой дискретизации датчиков контролируемых параметров, требует эталонных режимных состояний двигателя	-	-	+(недели)
Вероятностный метод оценки технического состояния	суточный (остаточный ресурс электродвигателя)	-	-	+(месяц)
Алгоритмы разложения временных рядов	Определен временем вычислений для разложения временных рядов I_a , I_b , I_c	+	+	-

Таблица 3.13.2 – Сопоставление обеспечения реализации перехода к предсказательной системе ТОиР по сравнительным функциональным признакам.

Функциональные признаки	ТОиР по фактическому состоянию	Предсказательное ТОиР	Рассмотренный алгоритм
Определение вероятности неисправного состояния оборудования	На основе статистических и физических моделей	На основе собранных данных об эксплуатации, диагностических параметров, данных мониторинга	Алгоритм поиска частотных составляющих, алгоритм оценки состояний ЭМО, алгоритмы определения группового состояния электропривода в узлах нагрузки, Вероятностный метод оценки технического состояния
Определение остаточного ресурса	Статистика, Теория вероятности, теория надежности	Машинное обучение, статистика	Алгоритм оценки состояний ЭМО, Вероятностный метод оценки технического состояния
Выявление дефектных узлов	частично	да	Алгоритм поиска частотных составляющих, программный датчик для обнаружения повреждения подшипника, разложение временных рядов
Выявление дефектов на ранней стадии	нет	да	Разложение временных рядов, алгоритм поиска частотных составляющих, программный датчик для обнаружения повреждения подшипника
Прогнозирование временных рядов диагностических параметров	нет	да	Алгоритм поиска частотных составляющих
Диагностика без остановки оборудования	да	да	Алгоритм поиска частотных составляющих, алгоритмы определения группового состояния электропривода в узлах нагрузки
Принятие решения об объеме технического воздействия	нет	да	Алгоритм поиска частотных составляющих, разложение временных рядов
Возможность выявлять новые виды дефектов и их причины	нет	да	Разложение временных рядов

Продолжение таблицы 3.13.2

Необходимость физического описания повреждения	да	нет	Программный датчик для обнаружения повреждения подшипника, разложение временных рядов, алгоритм оценки состояний ЭМО, вероятностный метод оценки технического состояния
Требование к сбору больших объемов данных	нет	да	Алгоритмы определения группового состояния электропривода в узлах нагрузки, разложение временных рядов, алгоритм оценки состояний ЭМО, вероятностный метод оценки технического состояния

Таким образом, комплекс методов и алгоритмов позволяет перейти к ПСТОиР на основе распознавания режимов работы, определения видов дефектов на ранней стадии развития, прогнозирования уровня развития дефектов и оценки вероятности их появления.

3.14 Выводы по главе 3

1. Проведен сравнительный анализ математических подходов для анализа эксплуатационных данных, данных систем диагностического мониторинга оборудования, оценки и прогнозирования остаточного ресурса ЭМО, необходимого для перехода к ПСТОиР. Выявлены недостатки статистических моделей и моделей на основе искусственного интеллекта, которые решаются путем разработки гибридных моделей машинного обучения, объединяющих преимущества различных способов посредством их интеграции, что позволяет улучшить интерпретируемость благодаря использованию ограничений физических параметров и факторов в условиях ГиНГП. Предложен комплекс алгоритмов обработки эксплуатационных данных и диагностических признаков на основе средств искусственного интеллекта для определения вида повреждения и классификации режимов работы ЭМО в ЭТК ГиНГП позволяющий перейти к ПСТОиР ЭМО.

2. Разработаны алгоритмы анализа и определения пороговых значений амплитуд проявления дефектов спектра тока, напряжения и мощности ЭМО, а также выявления девиации и отклонения годографа обобщённого тока от вектора напряжения с учётом минимизации обрабатываемых и хранящихся данных. Данные алгоритмы используются для оценки состояния элементов в узлах ЭМО, представленных в виде лепестковых диаграмм, отражающих совокупное фактическое состояние необходимые для последующего анализа и прогнозирования развития дефектов.

3. Предложен метод прогнозирования и оценки вероятности безотказной работы по электрическим и вибрационным параметрам с учётом эталонных значений на основе двух нейронных сетей Кохонена для реализации системы управления режимами ЭМО на основе выявленных неисправностей путем определения расстояния K_d , позволяющего дать количественное значение оценки расстояния до центра ближайшего кластера и определить подсистему, в которой есть повреждение с учетом проведенной кластеризации.

4. Разработан метод оценки вероятности безотказной работы на основе определения величины остаточного ресурса электромеханического оборудования с учетом работы ИНС по ретроспективным данным качества электрической энергии, вибрационным и электрическим параметрам, а также параметрам условия эксплуатации АДКЗ с применением ИНС многослойного персептрона (*MLP*).

5. Разработан алгоритм определения режимов работы и диагностики состояния электропривода в узле нагрузки, содержащем группу ЭМО по суммарному потоку энергии на основе методов «опорных векторов» *SVM* и *K*-ближайших соседей *KNN*. В качестве набора данных для работы алгоритма при обучении предложен массив точек, значения которых рассчитываются с помощью алгоритмов предварительной обработки для разделения наборов данных при обучении классификаторов с последующим ансамблированием. Для обеспечения точности модели более 90% предложено использование в качестве источника синтетического набора данных результатов имитационного моделирования,

которые включаются в основной набор и обеспечивают балансировку выборки данных для выделения особенностей классов состояний при кластеризации.

6. Разработан алгоритм функционирования программного датчика, представляющий собой математический аппарат, сочетающий векторное преобразование Парка и ИНС-классификатор, обученный с использованием методов дерева решений, опорных векторов и K -ближайших соседей, который позволяет в реальном времени в системах мониторинга обнаруживать дефекты подшипников в электромеханическом оборудовании с точностью более 95%.

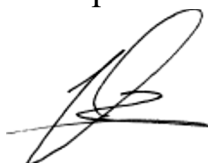
7. Предложен алгоритм раннего обнаружения дефектов на основе сингулярного анализа спектра тока АДКЗ, отличающийся тем, что позволяет выделять компоненты временного ряда, идентифицирующие наличие дефекта на ранней стадии развития и в последующем сопоставлять изменения вклада компонент с потерями энергии для определения вклада повреждений в снижение показателей энергетической эффективности.

8. Доказана, на основе проведенных исследований на экспериментальных и смоделированных данных, эффективность средств искусственного интеллекта при построении комплекса алгоритмов мониторинга, оценки остаточного ресурса и прогнозирования вероятности выхода из строя ЭМО с учётом управления режимами работы, позволяющего перейти к ПСТОиР ЭМО.

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

На правах рукописи

Жуковский Юрий Леонидович



ТЕОРИЯ, МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОЙ И
ЭФФЕКТИВНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО
ОБОРУДОВАНИЯ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ ГОРНЫХ И
НЕФТЕГАЗОВЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Том 2

Санкт-Петербург – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ТОМ 2

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	5
4.1 Электромеханическое оборудование как элемент цифрового двойника.....	5
4.2 Формирование архитектуры цифрового двойника.....	9
4.3 Архитектура цифрового двойника для управления безопасной и эффективной эксплуатацией в ЭТК ГиНПП.....	12
4.4 Классификация объемов данных и тяжести последствий аварий электромеханического оборудования.....	14
4.5 Анализ энергетических показателей и учёт взаимного влияния фактического состояния при формировании контуров управления цифровых двойников ЭТК ГиНПП.....	21
4.6 Определение подсистем и параметров для оценки взаимного влияния.....	25
4.7 Аналитические зависимости показателей энергоэффективности и надежности электромеханической подсистемы.....	31
4.8 Определение сценарных условий изменения электропотребления/электрических нагрузок от времени в изменяющихся условиях эксплуатации ЭТК ГиНПП.....	36
4.9 Сценарная оценка потерь электрической энергии на стадии эксплуатации жизненного цикла ЭМО.....	42
4.10 Оценка рисков и уровня потерь электрической энергии.....	46
4.11 Модель оценки стоимости жизненного цикла эксплуатации ЭМО.....	56
4.12 Оценка воздействия эксплуатации ЭМО в ЭТК на окружающую среду	58

4.13	Модель комплексного управления устойчивым развитием ЭТК МСК на основе сценарных условий.....	67
4.14	Моделирование влияния вызовов и цифровых технологий на износ энергетической инфраструктуры.....	80
4.15	Обобщенная карта определения технических воздействий.....	87
4.16	Выводы по главе 4.....	87
ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ СЕРВИСОВ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ С УЧЕТОМ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ.....		
5.1	Анализ архитектур построения сервисов.....	90
5.2	Комплексная архитектура взаимодействия сервисов децентрализованной системы управления жизненным циклом эксплуатации ЭМО в ЭТК МСК.....	91
5.3	Сервисы анализа и прогноза энергопотребления.....	97
5.4	Разработка сервиса диагностики.....	99
5.4.1	Сервис прогнозирования развития дефектов.....	102
5.4.2	Разработка сервиса сбора первичных данных для анализа тока.....	103
5.4.3	Сервис управления ТОиР.....	105
5.5	Разработка сервиса для формирования синтетических данных параметров узла нагрузки.....	109
5.6	Разработка алгоритма управления спросом на электроэнергию ЭМО в ЭТК.....	120
5.7	Сервисы формирования цифровых моделей.....	127
5.8	Архитектура сервиса учета углеродного следа на основе распределенного реестра.....	129
5.9	Разработка сервиса дополненной реальности.....	133

5.10	Сервисы обнаружения и восполнения недостающих данных	139
5.11	Выводы по главе 5	142
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		144
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ		148
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ		161
ПРИЛОЖЕНИЕ А Технологические блоки необходимые для перехода к интеллектуальной энергетике		208
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности		227
ПРИЛОЖЕНИЕ В Акты внедрения результатов диссертационного исследования		251

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

4.1 Электромеханическое оборудование как элемент цифрового двойника

Создание комплексной интегрированной информационно-аналитической системы автоматизации с одной стороны и оценки надежности с другой стороны на сегодняшний день являются основными задачами и направлениями развития современных ГиНПП. Внедрение энерго-ресурсосберегающих технологий и цифровая трансформация создают спрос на развитие технологий ЦД, которые необходимы для оценки и прогнозирования состояния оборудования. При этом требуются исследования и разработки в части архитектур и методологии построения ЦД. Разработка подразумевает наращивание возможностей по мере развития интеграции в управлении процессами и оборудованием (Рисунок 4.1.1), то есть система разрабатывается с учетом общей концепции долгосрочного развития с возможностью наращивания и масштабирования функционала.



Рисунок 4.1.1 – Уровни развития интеграции в управлении процессами и оборудованием на основе цифрового двойника

ЦД может представлять исторические и текущие состояния физического объекта в реальном времени. Используя конкретные приложения, можно генерировать визуализацию физического объекта, комбинируя трехмерную модель

с данными также в реальном времени. Кроме того, различные симуляции могут быть выполнены с использованием существующих имитационных моделей или путем создания новых моделей, которые станут частью двойника [293].

Также ЦД может напрямую сравнивать и анализировать теоретические значения, полученные в цифровой среде и реальные данные этапов жизненного цикла физического ЭМО. В результате он может итеративно оптимизировать различные действия на протяжении всего жизненного цикла оборудования. В виртуальном пространстве двойник может моделировать, отслеживать, оптимизировать и проверять различные действия; кроме того, может быть реализована плавная координация всего жизненного цикла изделия. Следовательно, информационных островков и дублирования данных можно эффективно избежать (Рисунок 4.1.2).

Согласно этим объяснениям и определениям цифрового двойника, суммируются следующие характеристики:

1. Отражение в реальном времени. Возможность сверхвысокой синхронизации и точности с физическим пространством.

2. Взаимодействие и конвергенция. В физическом пространстве данные, созданные на разных этапах в физическом пространстве, могут быть связаны друг с другом. Между историческими данными и данными в реальном времени цифровые данные двойников более полны. Это не только зависит от экспертных знаний, но и позволяет своевременно собирать данные из всех развернутых систем. Таким образом, данные могут быть глубоко изучены и более полно использованы посредством конвергенции. Между физическим и виртуальным пространствами они не изолированы друг от друга в цифровом двойнике. Между двумя пространствами организуются каналы связи, благодаря чему они легко взаимодействуют [80].

3. Саморазвитие. ЦД может обновлять данные в режиме реального времени, так что виртуальные модели могут постоянно улучшаться путем сравнения виртуального пространства с физическим пространством [74].

Большие данные автоматизированного электропривода могут формироваться различными источниками:

- математическими моделями элементов ЭМО, механизмов и технологического процесса в целом;
- датчиками различных переменных, установленных непосредственно в ЭМО, механизмах и технологических процессах;
- физической моделью ЭМО;
- данными условий эксплуатации ЭМО и системы ТОиР.

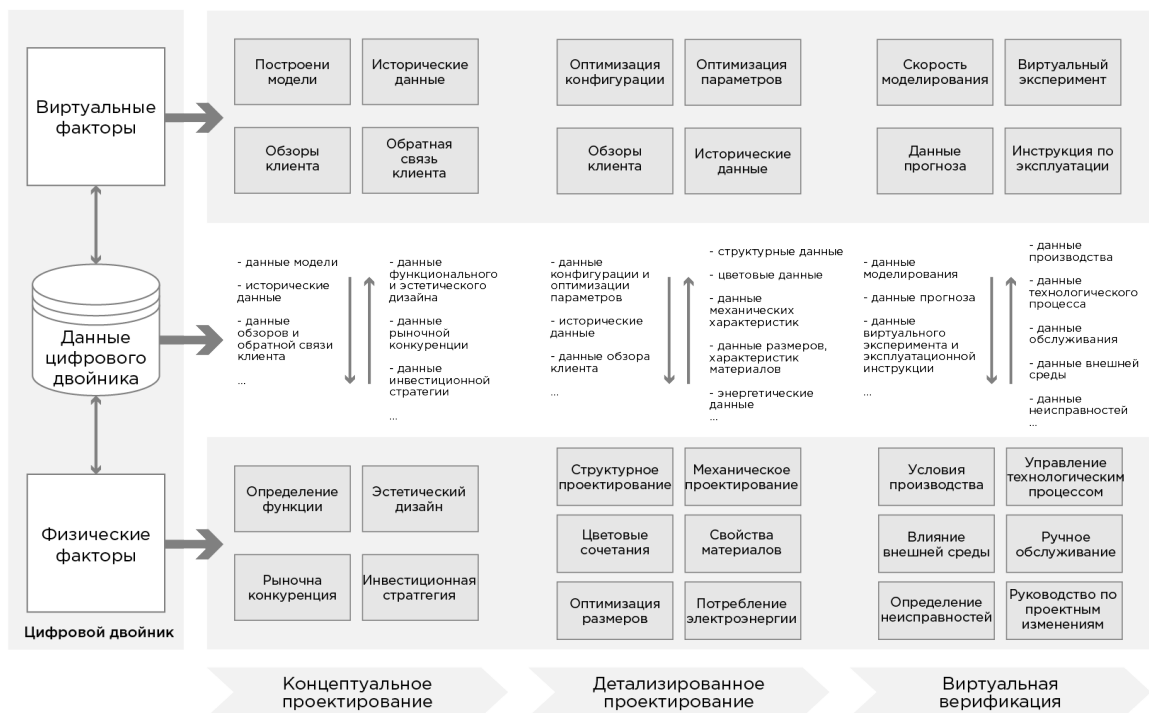


Рисунок 4.1.2 – Определение комплекса влияющих факторов при разработке ЭМО на основе цифрового двойника

Например, датчиковая обвязка современного асинхронного двигателя в составе электропривода содержит комплекс первичных измерителей, в частности:

- датчики токов и напряжений статора, интегрированные в клеммную коробку;
- датчики токов и напряжений, интегрированные в обмотку статора и ротора;
- датчики вибрации, интегрированные в корпус и ротор двигателя;
- датчики вибрации, интегрированные подшипниковые узлы двигателя;

- датчики температуры различных элементов двигателя;
- датчики шума двигателя;
- внешние модули диагностики.

Как правило, интегрированными датчиками тока и напряжения в клеммную коробку и обмотки статора (ротора) оснащаются новые типы приводных двигателей. Интеграцию датчиков на этапе эксплуатации приводного двигателя возможно реализовать при замене обмотки. Внешние модули систем диагностики электроприводов монтируются непосредственно на корпус двигателя через теплопроводящую пластину с помощью болтового соединения. Также внешние модули могут монтироваться на корпус передаточных устройств и исполнительных механизмов. Подключение электрических контактов питания и информационных каналов связи не требуется. Энергообеспечение и информационная интеграция внешних модулей осуществляется беспроводным способом.

Автоматизированный электропривод может оснащаться диагностическими модулями преобразователей частоты, которые устанавливаются на его входе и выходе. Преобразователи частоты являются нелинейной нагрузкой источников электроэнергии и импульсными источниками питания для приводных двигателей.

В состав информационной части как ЭМО, так и ЭТК входят системы связи и коммуникаций, которые предназначены для интеграции электроприводов машин или установок, системы электроснабжения в общую систему автоматизированного управления предприятием. Для организации такого взаимодействия в современных электроприводах используются различные системы связи, основные характеристики (Таблица 4.1.1). В настоящее время для организации взаимодействия между элементами ЭТК ГиНГП, взамен указанных протоколов связи, все больше применяется глобальная сеть Интернет с проводными и беспроводными протоколами связи [86].

Таблица 4.1.1 – Характеристики протоколов связи в электромеханических комплексах

Уровень системы управления	Назначение	Протоколы
Прикладной	Взаимодействие сети и пользователя	Modbus, PROFIBUS,
Представительский	Преобразование протоколов	TDI, XDR, AFP

Продолжение таблицы 4.1.1

Сеансовый	Функционирование связи, обмен информацией	ASP, ADSP, DLC
Транспортный	Обеспечивает сохранность данных	TCP, UDP, AEP
Сетевой	Оптимизирует маршрут движения данных	IP, ARP, DHCP
Канальный	Выполняет проверку данных на наличие дефектов	STP, ATM, SLIP
Физический	Передач электрических и оптических сигналов	RS-232, RS-422, RS-485

4.2 Формирование архитектуры цифрового двойника

ЦД ЭМО создается путем объединения комплекса математических моделей с реальными данными, полученными в результате их прямого и косвенного измерения. При создании цифрового двойника используются данные на основе исследования всех штатных и нештатных режимов работы с накоплением трендов всех переменных.

Особенность формирования цифрового двойника ЭМО заключается в следующих аспектах:

- невозможности определения всех режимов работы на одном электроприводе, так как режимы работы и частота их изменения определяется работой исполнительного механизма, который в электроприводе не изменяется;
- невозможности определения всех неисправностей на одном электроприводе, т.к., в каждом элементе электропривода может развиваться одна или группа связанных неисправностей, которая является причиной выхода одного элемента из строя и всего электропривода, при этом другие неисправности могут не возникать;
- невозможности получения универсального цифрового двойника, который мог бы соответствовать укрупненным группам электроприводов с комплексными классификационными признаками, например, диапазонам мощностей, количеству пар полюсов, классам напряжений и другим.

Принцип построения цифрового двойника ЭМО основан на формировании больших данных, которые описывают работу приводного двигателя (оригинала) во

всех режимах работы и на всех этапах жизненного цикла эксплуатации электропривода, с учетом изменений условий эксплуатации, свойств технологических процессов и других факторов. На данном принципе может быть построен ЦД ЭМО в целом.

Для построения цифрового двойника необходимо сформировать эталонную модель. Эталонная модель цифрового двойника системы будет состоять из следующих блоков:

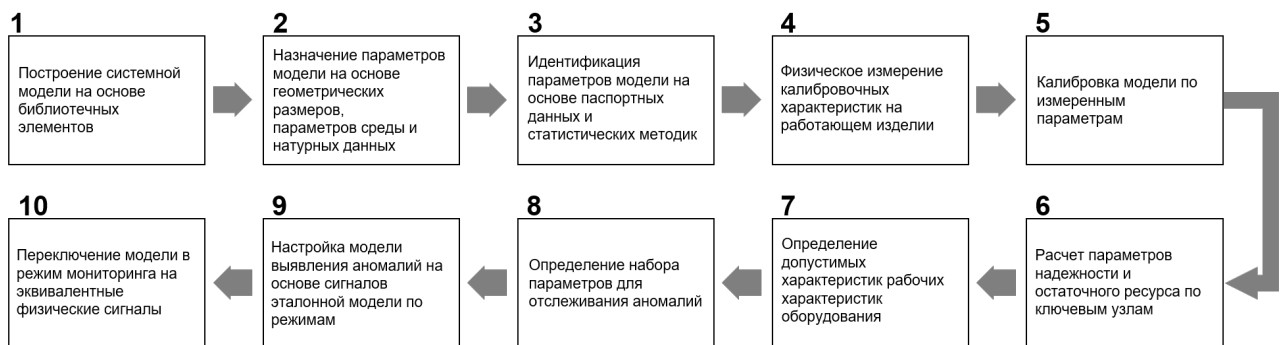


Рисунок 4.2.1 – Получение эталонной системной модели

Виды данных, используемых в эталонной модели:

- данные системного и численного моделирования;
- техническая и чертежная документация, протоколы;
- оцифрованный экспертный опыт (исторические данные);
- оцифрованные действия персонала (операционные данные);
- результирующие данные, полученные из блока машинного обучения и статистики;
- эксплуатационные данные;
- управляющие и физические сигналы;
- данные окружающей среды.

Для решения проблемы недостаточности одного приводного двигателя (одного оригинала) необходимо использовать в качестве оригинала укрупненные группы электроприводов с комплексными классификационными признаками. Это позволит обеспечить формирование больших данных цифрового двойника, используя в качестве оригинала несколько электроприводов, которые могут быть оснащены как комплексной датчиковой обвязкой, так и локальной датчиковой

обязкой. Такой подход позволит пополнять большие данные информацией об изменении состояния группы электроприводов, работа которых может характеризоваться различными режимами, развитием различных неисправностей, разными условиями эксплуатации.

При этом сбор первичной информации осуществляется с нескольких электроприводов, которые обеспечивают идентичные технологические процессы и соответствуют друг другу по структуре и составу силового и управляющего оборудования. Все электроприводы, оснащенные датчиковой обязателькой, учувствуют в формировании общего цифрового двойника.

Широкая степень охвата системы сбора больших данных в ЭТК ГиНГП и постоянное ее пополнение позволит создавать цифровые двойники, которые необходимо использовать для ранней диагностики неисправностей, в системах прогнозирования состояния электропривода, определять причины снижения эксплуатационных, динамических и энергетических характеристик, получать рекомендации по изменению электропривода, создавать основу для системы промышленного интернета.

Групповая система формирования цифровых двойников относительно индивидуальной системы обладает следующими преимуществами:

- позволяет охватить большее количество ЭМО;
- повысить точность работы цифрового двойника;
- позволяет отслеживать большее количество режимов работы ЭМО;
- позволяет собрать информацию о развитии различных неисправностей;
- учесть различные внешние факторы, влияющие на работу ЭМО;
- обеспечивает выявление причин различных неисправностей;
- фиксировать критические состояния силового оборудования

электропривода.

4.3 Архитектура цифрового двойника для управления безопасной и эффективной эксплуатацией в ЭТК ГиНГП

Развитие нефтяной промышленности Российской Федерации на сегодняшний день характеризуется значительным снижением добычи нефти. Это связано с тем, что большинство нефтяных месторождений России находятся на поздней стадии разработки. Процессы добычи нефти часто сопровождаются нежелательным образованием органических отложений, таких как асфальтосмолопарафиновые отложения (АСПО), в призабойной зоне пласта, на стенках подземного оборудования скважин, в наземных коммуникациях системы сбора и подготовки нефти. Образование АСПО приводит к значительному сокращению межремонтного периода эксплуатации ЭМО по причине полного перекрытия проходного сечения насосно-компрессорных труб (НКТ), кольцевых каналов в затрубном пространстве, заклиниванию насосного оборудования.

Частные проблемы в системах электроснабжения, ввиду отсутствия локальных систем мониторинга энергопотребления, связаны с провалами напряжения источника питания добычного комплекса, что приводит к снижению номинального момента и скорости вращения электропривода, а в критических случаях к полной остановке оборудования. Отсутствие современных преобразователей частоты, обеспечивающих энергетическую развязку, не позволяет возобновить работу после устранения провалов напряжения. С другой стороны, это вызвано несовершенством архитектуры СЭС.

Эксплуатация ЭМО в тяжелых условиях (климатические, нестационарные и перегрузочные режимы работы, специфика углеводородов) сопряжена с быстрым износом и внеплановым выходом из строя. Несвоевременное обнаружение из-за территориального разброса приводит к нарушениям режимов работы, комплексным авариям и длительному простоему, и потере добывающей скважины. Появление дефектов приводит не только к ускоренной деградации оборудования, но и к выходу из оптимума систем управления приводом, что в случае поддержания работоспособности (требуемого момента и частоты вращения) увеличивает энергопотребление.

Подсистема мониторинга надежности и энергоэффективности объектов нефтедобычи, на основе проведенных исследований и предложенных алгоритмов по оценке и прогнозированию остаточного ресурса на основе интеллектуальных средств диагностики, может быть представлена в виде комплекса показателей, которые отражают взаимное влияние условий эксплуатации и технического состояния оборудования, а также дополнительные потери энергии, которые обусловлены появлением влияющих факторов.

Таким образом, система энергообеспечения, электрический привод и связанный с ним исполнительный механизм на объектах ГИНГП являются ключевым звеном для формирования архитектуры и методологических подходов создания «цифровых двойников» для управления безопасной и эффективной эксплуатацией. На (Рисунок 4.3.1) представлена архитектура цифрового двойника управления эффективной и безопасной эксплуатацией в условиях предприятия добычи нефти. Формирование базовых модулей цифрового двойника в последствии может быть расширено, и ЦД объекта добычи нефти может дополняться (Рисунок 4.3.1).

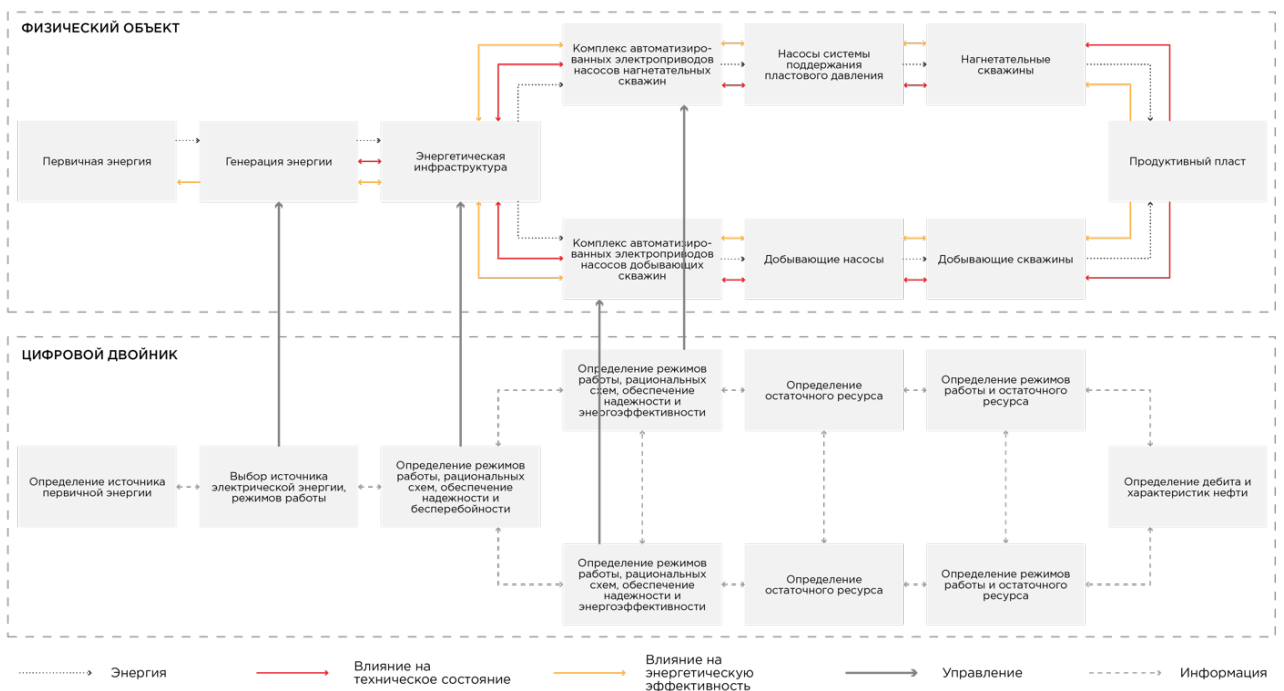


Рисунок 4.3.1 – Архитектура цифрового двойника для безопасной и эффективной эксплуатации объекта добычи нефти

Учитывая предложенную структуру необходимо уделить особое внимание к построению архитектур и алгоритмов, которые в последствии могут стать модулями (сервисами), образующими «ЦД» в части технологической цепочки жизненного цикла энергии: первичная энергия – генерация – система электроснабжения – электрический привод – приводной механизм – скважина – пласт. Для определения зон эффективности в контуре управления интеллектуальным алгоритмам, построенным на базе сервисов, необходимо определение ключевых показателей эффективности в разрезе эталонных значений для формирования последующих коридоров допустимых, критических и предельных значений, основанных на накопленных данных.

Таким образом, вводится определение для предлагаемой архитектуры цифрового двойника процессов управления эксплуатацией ЭМО в составе ЭТК ГиНГП. ЦД – это комплекс программных аналогов структурных элементов ЭТК, осуществляющий всестороннее взаимодействие цифровых моделей, систем мониторинга, передачи и хранения данных, моделирующий внутренние процессы, технические характеристики и поведение реальных объектов, комплексов и процессов, происходящих в них под воздействием факторов, помех и внешней среды.

4.4 Классификация объемов данных и тяжести последствий аварий электромеханического оборудования

Применение глобальной системы управления программой технического обслуживания и ремонта электромеханического оборудования на основе комплексных методов диагностики и оценки остаточного ресурса позволит интегрировать предприятия отрасли в единую диагностическую сеть. При этом система организует сбор и обработку статистических данных, тем самым повышая точность оценки состояния оборудования, что позволит удаленным пользователям оценить текущее состояние и остаточный ресурс электромеханического оборудования в соответствии с его фактическим состоянием. Система будет сочетать совместную работу производителей электромеханического оборудования

и промышленных предприятий, использующих оборудование в своих технологических процессах. Этот альянс обеспечит передовые знания о характере и уровнях дефектов, позволит снизить эксплуатационные расходы и повысить энергоэффективность производства.

Концепция Интернета вещей (*IoT*) и ее конкретная реализация в реальном секторе экономики – промышленный интернет вещей (*IIoT*) заключается в организации вычислительной сети реальных физических объектов: автомобилей, электродвигателей, дронов, роботизированных блоков, «умных счетчиков» и т.д.

Количество областей, в контексте которых рассматривается необходимый технологический стек для развертывания интернет-сетей вещей, увеличивается. Например, для реализации одноранговых (*P2P*) сетей в архитектуре интернета вещей, для которых основной проблемой является отсутствие возможных сценариев обмена данными при условии, что на каждом узле сети собирается большой объем информации. При этом основным недостатком является отсутствие механизма децентрализованной синхронизации новых узлов с другими участниками сети в условиях применения приложений технологии блокчейн в групповом управлении объектами и оборудованием, а также в координации децентрализованной автономной организации (*DAO*) на основе «смарт-контрактов» – электронных алгоритмов, описывающих набор условий, реализация которых влечет за собой некоторые события в реальном мире и/или цифровых системах. Данная концепция позволяет создавать автономные системы, способные к самоорганизации путем заключения различного рода договоренностей, например, обмен запасными частями или распределения локальных задач для обслуживающего персонала или робототехнических подразделений для достижения глобальной цели эффективного и безопасного управления эксплуатацией оборудования.

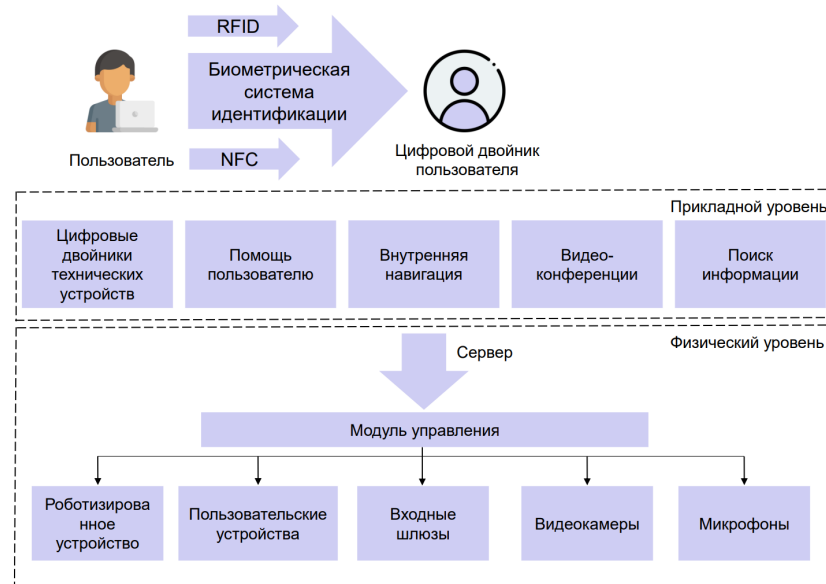


Рисунок 4.4.1 – Структура умного киберпространства промышленного предприятия

Общим в большинстве определений технологии *Smart Grids SG* является применение цифровой обработки и связи в энергосистеме, что делает поток данных и управление информацией центральными в *SG*. Новые возможности и преодоление барьеров эффективности становятся доступными благодаря глубокой интеграции использования цифровых технологий с электрическими сетями. Интеграция новой информации об оборудовании в сети электроснабжения и потребителях является одной из ключевых проблем при проектировании *SG*.

Современные электротехнические и энергетические компании стремятся действовать в трех направлениях – усиление инфраструктуры сети, оцифровка сети и интеграция потребителей, преобразование бизнес-процессов. Внедрение технологий *SG* предполагает анализ огромного количества данных. Чтобы получить представление о необработанных данных и получить конкурентное преимущество, каждая промышленная компания должна стать компанией-разработчиком программного обеспечения не только для того, чтобы выжить, но и для процветания.

Цифровые платформы позволяют использовать *plug-and-play* решения, включая доступ к базам данных, базам знаний, вычислительным ресурсам, сервисам визуализации сервисами облачных вычислений (*PaaS – platform as service*). Ключевой идеей таких киберфизических платформ является цифровая

копия всех комплексов оборудования и объектов, технических подразделений и специалистов (Рисунок 4.4.2). Эти цифровые сущности могут взаимодействовать друг с другом в информационном поле на прикладном уровне системы. Любое решение, которое было принято в этой области, реализуется на физическом уровне системы. Реализацию цифрового двойника системы управления эксплуатацией ЭМО необходимо рассматривать как неотъемлемую часть интеграции с системой *SG*, которая может быть построена на базе 4 основных вариантов организации вычислительной сети (Рисунок 4.4.2) [333].

Вариант 1. Обучение математической модели в данном случае осуществляется на специализированном сервере. Это означает, что узлы сети могут иметь минимальную вычислительную мощность, которая не предполагает серьезных расчетов, а значит, каждый вычислительный узел сети при прочих равных условиях будет иметь более низкую себестоимость. При этом каждый запрос на использование обученной математической модели будет обрабатываться на одном сервере, что потребует большой пропускной способности сети.

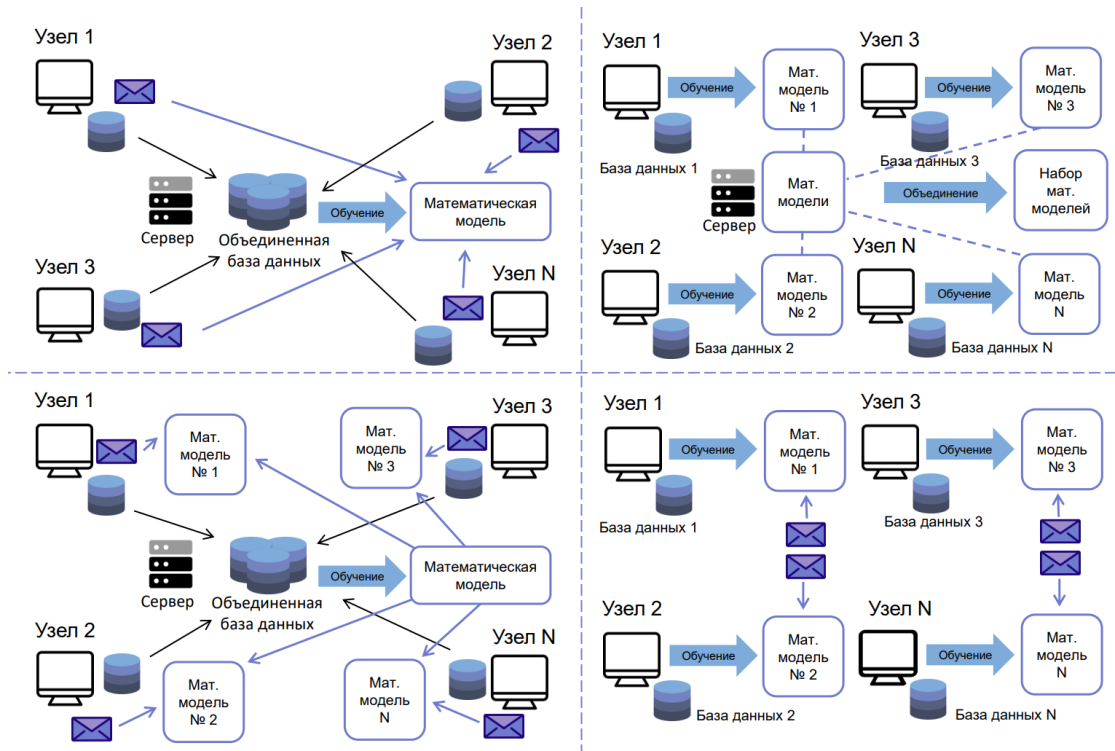


Рисунок 4.4.2 – Структура умного киберпространства промышленного предприятия

Вариант 2. Этот вариант также включает в себя обучение математической модели на выделенном сервере. Но в отличие от предыдущего случая обученная

математическая модель затем копируется на каждый вычислительный узел, функционирование которого она требует. Преимущество этого варианта заключается в том, что наиболее дорогостоящей в вычислительном отношении операцией является изучение модели на сервере, обладающем достаточной вычислительной мощностью, и использование изученной модели непосредственно на самом вычислительном узле. Такой подход позволит значительно сократить объем информации, отправляемой с каждого вычислительного узла на сервер. Это позволит использовать освободившуюся полосу пропускания для более эффективного обмена данными между узлами сети.

Вариант 3. В этом случае на каждом узле сети изучается математическая модель на данных, которые собираются и готовятся на этом вычислительном узле. Затем обученные математические модели отправляются на специализированный сервер, на котором формируется так называемый ансамбль моделей. Причем дальнейшее взаимодействие с ансамблем полученных моделей также может быть различным: его можно скопировать на каждый вычислительный узел для дальнейшего использования, либо его можно оставить на сервере и использовать только там в дальнейшем.

Итоговый ансамбль моделей, как показывает практика, имеет гораздо более высокий процент правильных ответов при тестировании, что означает лучшее решение прикладных задач.

Вариант 4. В этом случае математические модели обучаются отдельно на каждом вычислительном узле, используя тот же набор данных, который был скомпилирован на этом узле. Затем полученная математическая модель используется на том же узле при получении запроса. Такой вариант избавляет от необходимости интеграции децентрализованной сети с выделенным сервером, что упрощает организацию сети. Но обучение и использование математических моделей на каждом вычислительном узле значительно увеличивает минимально допустимую планку вычислительной мощности каждого участника сети.

Особую важность при построении сетей *SG* имеют вопросы получения и обработки данных для оценки текущего состояния используемого

электрооборудования, своевременной диагностики аварийных и предаварийных режимов его работы, оценки остаточного ресурса для перехода к предсказательному обслуживанию. С этой целью для правильного выбора варианта вычислительной сети необходимо дополнительно рассмотреть классификации по объёмам данных от подсистем электромеханического оборудования и скорости обработки данных для прогнозирования технического состояния с учетом установления категории тяжести последствий отказов.

Предлагается классификация с позиции распределенных вычислений в ЭМО:

1. Двигатель без управления, простая система, в которой можно включать, выключать и реверсировать машину. Для подключения необходимо использовать интеллектуальные датчики тока и напряжения низкой точности. Применяется для электродвигателей средней и малой мощности. Все данные хранятся и анализируются удаленно.

2. Управляемый двигатель, есть данные от датчиков тока и напряжения, данные от микроконтроллера. Реализовано управление мощностью и интеллектуальные датчики. Все данные хранятся и анализируются удаленно.

3. Интеллектуальный привод. Интегрированная система с большим количеством данных и предварительной обработкой собранных данных. Обычно это привод большой мощности. Часть данных анализируется на месте, хранение и глубокая обработка *Big Data* происходят удаленно.

4. Интеллектуальный привод, интегрированный в интеллектуальную сеть. Помимо предварительно обработанных данных от системы привода и подсистем питания, есть также данные от других подсистем, которые обеспечивают косвенные параметры (температура, влажность, агрессивность окружающей среды и т.д.). Обычно это привод большой мощности. Часть данных анализируется на месте в системе привода, часть данных предварительно обрабатывается в разных подсистемах, хранение, агрегация из других подсистем и глубокая обработка *Big Data* происходят удаленно.

5. Двигатель, используемый в интеллектуальных сетях. Множественные данные подсистем электроснабжения, есть также данные из других подсистем,

обеспечивающих косвенные параметры, а также данные прогнозирования электрической нагрузки, прогнозирования состояния элементов систем электроснабжения и т.д. Привод любой мощности. Данные предварительно обрабатываются в разных подсистемах, хранение, агрегация из других подсистем и глубокая обработка *Big Data* происходят удаленно.

Также необходимо рассмотреть классификацию систем с позиции скорости обработки данных:

1. Технические системы с критическим уровнем опасности, выход из строя электродвигателя приведет к опасности антропогенных аварий и угрозе жизни людей. Время опроса для диагностической системы и обработки данных для прогнозирования минимально. Прогнозирование состояния в будущем менее чем за 1 минуту.

2. Технические системы, в которых выход из строя приводит к остановке сложных процессов и производств, сопровождается значительным материальным ущербом, длительная остановка (на несколько часов) может привести к угрозе жизни людей. Время опроса минимально. Прогнозирование состояния в будущем занимает менее 10 минут.

3. Технические системы, механизмы и изделия, в которых выход из строя приводит к массовому недопроизводству, простоям персонала. Опрос датчиков происходит часто, прогнозирование с интервалом менее 1 часа.

4. Технические системы, механизмы и изделия, в которых отказ не наносит существенного ущерба, если продолжительность остановки составляет менее суток. Время собеседования нечастое, прогноз в будущем с интервалом менее 24 часов.

5. Технические системы, механизмы и изделия, в которых выход из строя не приводит к повреждению, если остановка составляет менее недели. Время обследования редкое, прогноз в будущем с интервалом менее месяца.

Комбинация из 3 классификаций, рассмотренных выше, представлена на (Рисунок 4.4.3). Первый вариант организации вычислительной сети больше подходит для электромеханических блоков с меньшей скоростью обработки

данных и меньшим объемом анализируемых данных, поэтому мы можем допустить задержки во взаимодействии клиент-сервер. Блоки, требующие наибольшей скорости обработки данных и наибольшего объема данных, рекомендуются к работе, используя третий сценарий.

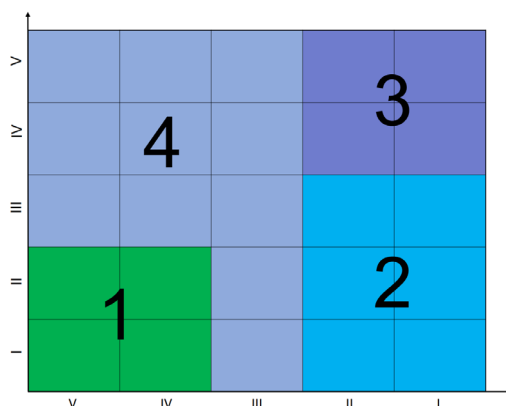


Рисунок 4.4.3 – Единая классификация электромеханических и вычислительных блоков *Smart Grid*

В этом случае вычислительные узлы используют модели машинного обучения на своем электромеханическом оборудовании. Если объем анализируемых данных ниже при той же высокой скорости обработки, возможно использовать второй вариант организации сети, используя ансамбль моделей машинного обучения. При этом можно получить более точную математическую модель, обученную на меньшем количестве наборов данных. И, наконец, для всех остальных ЭМО рекомендуется работать с использованием четвертого варианта организации сети.

4.5 Анализ энергетических показателей и учёт взаимного влияния фактического состояния при формировании контуров управления цифровых двойников ЭТК ГиНГП

Для построения ЦД необходима оценка энергетической составляющей и определение не продуктивных затрат при эксплуатации ЭМО в ЭТК ГиНГП на основе данных, полученных из подсистем (информационных сервисов) оценки состояния, прогнозирования и др. [1]. Данная оценка позволит определять уровень энергоэффективности эксплуатируемого оборудования и объекта в целом, что

позволит выстраивать контур управления энергоэффективностью на этапе эксплуатации [1]. Также предиктивное определение уровня энергоэффективности позволит выстроить контур управления мероприятиями по энергосбережению и формированию планов и программ по энергосбережению по всему парку оборудования на основе «цифрового двойника».

Критерии энергетической оценки ЭМО рассматриваются в главе 2 том 1, где разработаны показатели, которые необходимо отслеживать для диагностики и построения интеллектуальных алгоритмов оценки и прогнозирования остаточного ресурса.

Межвитковые замыкания на начальном этапе себя практически не проявляют, однако наличие короткозамкнутых витков приводит к повышенному нагреву обмотки, увеличению потерь в двигателе, особенно в режиме холостого хода, однако только по величине потерь определить их причину затруднительно без использования подходов, основанных на технологии «ЦД» и сервисов, отвечающих за контроль определенных параметров и прецедентов.

Для определения зон эффективности в контуре управления интеллектуальным алгоритмам, построенным на базе сервисов, необходимо определение ключевых показателей эффективности в разрезе эталонных значений для формирования последующих коридоров допустимых, критических и предельных значений, основанных на накопленных данных. Для расчета энергоэффективности используем оценку через расход электроэнергии на подъем единицы объема продукции, либо расход электроэнергии на подъем единицы массы продукции [10, 19, 91]. Удельные затраты электроэнергии находят из выражения (4.5.1).

$$W_{уд.}^{об.} = \frac{W}{Q_{ч} \cdot T}, \quad (4.5.1)$$

где $Q_{ч}$ – подача за час, м³/ч;

$W_{уд.}^{об.}$ – объемные удельные затраты электроэнергии, кВт·ч/м³;

W – потребленная из сети энергия за время T , кВт·ч;

T – время, за которое производится определение удельных затрат электроэнергии, ч.

Если расчеты выполняются по данным за один час, то (4.5.1) принимает вид (4.5.2).

$$W_{уд.}^{об.} = \frac{P_{\Sigma}}{Q_{ч}}, \quad (4.5.2)$$

где P_{Σ} – потребляемая из сети среднечасовая мощность, кВт.

Отношение среднечасовой мощности к часовому массовому дебиту $Q'_{ч}$ (4.5.3).

$$W_{уд.}^{м.} = \frac{P_{\Sigma}}{Q'_{ч}}, \quad (4.5.3)$$

где $W_{уд.}^{м.}$ – массовые удельные затраты электроэнергии, кВт·ч/т;

$Q'_{ч}$ – часовой дебит нефти по массе, т/ч.

При оценке энергоэффективности удельных затрат на подъем продукции с глубины в один километр удельный расход электроэнергии приводят к динамическому уровню кВт·ч/(км·м³) и кВт·ч/(км·т), тогда (4.5.2) и (4.5.3) будут иметь вид (4.5.4) – (4.5.5).

$$W_{уд.}^{об.} = \frac{P_{\Sigma}}{H_{д} \cdot Q_{ч}}. \quad (4.5.4)$$

$$W_{уд.}^{м.} = \frac{P_{\Sigma}}{H_{д} \cdot Q'_{ч}}. \quad (4.5.5)$$

При формировании поля данных в платформе агрегации данных нефтегазового месторождения первичный набор данных для сервиса мониторинга, анализа и прогноза энергопотребления примет следующий вид:

- фактическое потребление энергии – $E_{факт}$;
- установленная мощность – $N_{уст}$;
- потребляемая расчетная активная энергия (час, сутки, месяц, год) – $E_{акт}$;
- потенциал энергопотребления – $N_{пол}$;
- удельное энергопотребление – $K_{удел}$;
- коэффициент энергопотребления – $K_{эп}$;

- нормативное потребление энергии – $E_{\text{норм}}$;
- коэффициент энергоэффективности – $K_{\text{эф}}$.

Величина потребляемой мощности УЭЦН определяется по формуле [91] (4.5.6).

$$N = \frac{(P_{\text{буф}} + P_{\text{НКТ}} + \rho_{\text{см}} g H) \cdot Q}{\eta_{\text{ЭЦН}} \cdot \eta_{\text{ПЭД}}} + 1,73 \cdot I^2 r \cos \varphi \cdot L_{\text{каб}} + N_{\text{тр-р}} + N_{\text{СУ}}, \quad (4.5.6)$$

где I – рабочий ток;

$P_{\text{буф}}, P_{\text{НКТ}}$ – давление в буферном пространстве и НКТ;

Q – подача насоса;

$\eta_{\text{ЭЦН}}, \eta_{\text{ПЭД}}$ – КПД соответственно ЭЦН и ПЭД,

r – сопротивление 1 м кабеля; $L_{\text{каб}}$ – длина кабеля;

$\rho_{\text{см}}$ – плотность смеси; H – динамический уровень;

$\cos \varphi$ – коэффициент загрузки электродвигателя;

$N_{\text{тр-р}}, N_{\text{СУ}}$ – мощность, потребляемая трансформатором и станцией управления (СУ).

Потенциал энергопотребления определяется полезной мощностью насосной установки (4.5.7).

$$N_{\text{пол}} = P \cdot Q. \quad (4.5.7)$$

Установленная мощность определяется мощностью ПЭД и потерями энергии в кабельной линии, трансформаторе и системе управления (4.5.8).

$$N_{\text{уст}} = N_{\text{ПЭД}} + N_{\text{каб}} + N_{\text{тр-р}} + N_{\text{СУ}}. \quad (4.5.8)$$

Потребляемая активная энергия (4.5.9).

$$E_{\text{акт}} = 1,73 \cdot I \cdot U \cdot \cos \varphi \cdot t. \quad (4.5.9)$$

Потенциал энергоэффективности ΔE – разность между потребляемой активной энергией (в час, сутки, месяц, год) и нормативным потреблением энергии (4.5.10).

$$\Delta E = E_{\text{акт}} - E_{\text{норм}}. \quad (4.5.10)$$

Для оценки затрат электроэнергии используются коэффициенты энергоэффективности, энергопотребления для фактических и нормированных затрат энергии (4.5.11) – (4.5.13).

$$K_{\text{Эф}} = \frac{E_{\text{норм}}}{E_{\text{факт}}}. \quad (4.5.11)$$

$$K_{\text{Эп факт}} = \frac{N_{\text{пол}}}{E_{\text{факт}}} \cdot t. \quad (4.5.12)$$

$$K_{\text{Эп норм}} = \frac{N_{\text{пол}}}{E_{\text{норм}}} \cdot t. \quad (4.5.13)$$

Для сравнения разных ЭТК используют вариации показателя удельных затрат энергии (4.5.14) – (4.5.15).

$$K_{\text{удел}} = \frac{E}{Q_{\text{ж}}}, \quad (4.5.14)$$

$$K_{\text{удел}} = \frac{E}{Q_{\text{ж}} \cdot H_{\text{дин}}}, \quad (4.5.15)$$

где $Q_{\text{ж}}$ – добыча пластовой жидкости (м^3);

$H_{\text{дин}}$ – величина динамического уровня (м).

4.6 Определение подсистем и параметров для оценки взаимного влияния

Одной из наиболее весомых затрат в себестоимости продукции предприятий нефтегазового комплекса является составляющая оплаты стоимости электрической энергии. Выполненные исследования возможности повышения энергоэффективности на основании правильного выбора ценовой категории с последующим применением нейросетевых систем прогнозирования для нефтегазодобывающего предприятия, показанные в работах [18, 181, 189], обусловили проведение дополнительных исследований для прогнозирования электрических нагрузок предприятий МСК, включая оценку показателей надежности.

Проведенный комплекс исследований на сегодняшний день можно разделить на этапы:

- разработка моделей прогнозирования с целью управления режимами электропотребления нефтегазовых, горных предприятий;

- изучение вопросов повышения энергоэффективности распределения электроэнергии на предприятиях минерально-сырьевого комплекса с применением распределенной генерации путем прогнозирования электропотребления на основе сравнительного анализа методов прогнозирования;
- основные подходы к оценке эффективности внедрения установок погружных электроплунжерных насосов для эксплуатации малодебитных нефтяных и газовых скважин;
- анализ факторов, влияющих на удельное энергопотребление на примере нефтегазодобывающих предприятий;
- рекомендации по прогнозированию режимов электропотребления в условиях нефтегазовых предприятий;
- изучение проблемы надежности систем электроснабжения электротехнических комплексов промышленных предприятий [59].

Проведенный комплекс исследований включал этапы анализа подсистем мониторинга надежности, энергоэффективности. Ключевые оцениваемые показатели для выбранных подсистем:

- аналитические зависимости показателей энергоэффективности и надежности электромеханической подсистемы от времени для процессов добычи нефти на основе анализа неблагоприятных событий;
- сценарные условия изменения электропотребления/электрических нагрузок от времени в изменяющихся условиях эксплуатации электротехнических комплексов добычи нефти;
- оценка рисков объектов нефтедобычи с использованием методики *HAZOP* (англ. *HAZARD and OPERABILITY*, опасность и работоспособность) применительно для безопасности, эксплуатации, экологии.

Для построения информационной части описания объекта управления предлагается использовать обобщенные схемы. Обобщенные схемы на основе библиотек и правил могут подстраиваться на основе алгоритмов учитывая конкретные условия и оборудование. Разукрупнение схем возможно вести и обновлять на основе проектных схем электроснабжения. Данное обновление на

базе «цифрового двойника» необходимо также реализовывать в качестве отдельного сервиса.

В качестве примера рассмотрим обобщенную схема ГиНГП (Рисунок 4.6.1).

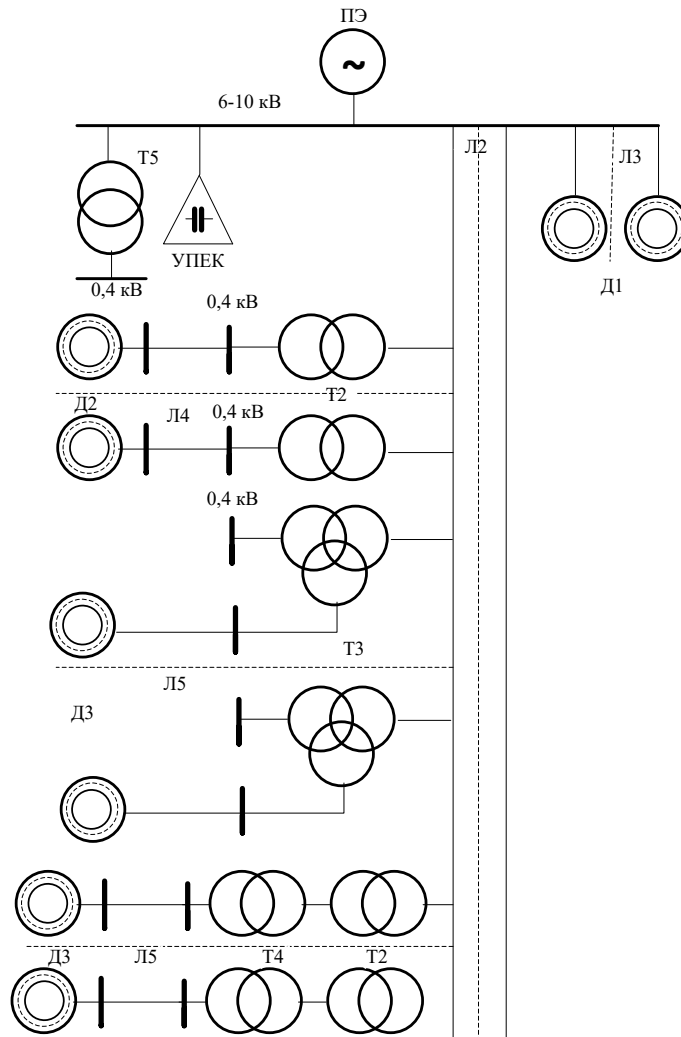


Рисунок 4.6.1 – Обобщенная СЭС НГДП

Анализ надежности необходим практически на всех этапах жизненного цикла систем и прежде всего на стадии проектирования. Главной целью формирования информационного поля конкретного объекта является получение достоверной информации, необходимой для выработки и обоснования управленческих решений в областях:

- обеспечения требуемого уровня надежности;
- оптимизации затрат на обеспечение надежности проектируемых или эксплуатируемых систем;
- планирование ремонта оборудования и замены оборудования.

Надежность – это комплексное свойство, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать безотказность, ремонтпригодность, восстанавливаемость, долговечность, сохраняемость, готовность или определенные сочетания этих свойств [59]. Основные свойства и выделенные показатели надежности (Таблица 4.6.1).

Таблица 4.6.1 – Показатели надежности

Свойство	Условное обозначение показателя	Наименование показателя
Ремонтпригодность	$P(tв)$ $\mu(t)$ $TВ$	Вероятность восстановления Интенсивность восстановления Среднее время восстановления
Безотказность	$P(t)$ $\lambda(t)$ T_0 $\omega(t)$ $T_{от}$	Вероятность безотказной работы Интенсивность отказов Средняя наработка до отказов Параметр потока отказов Средняя наработка на отказ
Долговечность	R_H $R_{мр}$ $T_{сл}$	Назначенный ресурс Средний ресурс между капитальными ремонтами (межремонтный ресурс) Средний срок службы
Сохраняемость	$T_{сх}$ $\gamma_{сх}$	Средний срок сохраняемости Гамма – процентный срок сохраняемости
Безотказность и ремонтпригодность (комплексные показатели)	K_g K_p K_i $K_{ог}$	Коэффициент готовности Коэффициент готовности Коэффициент технического использования Коэффициент технического использования

При последовательном развертывании сервисов на основе системы показателей, описанных в предыдущих главах и алгоритмах машинного обучения «ЦД» способен оказывать положительное воздействие на все показатели. Данное воздействие может осуществляться как непосредственно через контуры управления, так и через персонал, выстраивая долгосрочные программы управления компетенциями [78]. При оценке эксплуатационной надежности технических систем широко используются комплексные показатели, характеризующие одновременно несколько свойств надежности (безотказность, ремонтпригодность, долговечность). Наиболее распространенными

комплексными показателями являются коэффициенты готовности, оперативной готовности и технического использования. В качестве основного критерия рассмотрим коэффициент готовности, одновременно отвечающего за несколько свойств: безотказность и ремонтпригодность.

Коэффициент готовности K_r – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается. Коэффициент готовности характеризует готовность объекта к применению только в отношении его работоспособности и, следовательно, означает вероятность застать объект в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, причем этот момент не может быть выбран в тех интервалах времени, где применение объекта исключено. Коэффициент определяется как отношение математического ожидания времени нахождения объекта в работоспособном состоянии к сумме математических ожиданий этого времени и времени внеплановых ремонтов (4.6.1).

$$K_r = T_0 / (T_0 + T_B), \quad (4.6.1)$$

где T_0 – средняя наработка на отказ;

T_B – среднее время восстановления.

Учитывая ранее рассмотренную структуру УЭЦН, N_0 – мощность, поступающая на вход станции управления, N_1 – мощность, передаваемая от первого элемента ко второму, N_n – мощность на выходе с последнего элемента ЭЦН, общий КПД УЭЦН (4.6.2).

$$\eta = \frac{N_n}{N_0} = \frac{N_1}{N_2} \cdot \frac{N_2}{N_3} \dots \frac{N_{n-1}}{N_n} = \eta_1 \cdot \eta_2 \dots \eta_{N-1} \cdot \eta_n, \quad (4.6.2)$$

где η_n – КПД n-го элемента УЭЦН.

По критерию энергоэффективности добычи нефти можно предварительно сделать вывод: чем выше КПД УЭЦН, тем максимально произведение КПД не только отдельных ее элементов, но и то, что надежность выполнения заданных функций сложной системы, состоящей из n-элементов, обеспечивается

сохранением свойств надежности, как следствие – достижением показателей надежности для заданных интервалов времени.

Подсистема (набор сервисов) мониторинга надежности и энергоэффективности объектов нефтедобычи, базирующаяся на предложенных алгоритмах по оценке и прогнозированию остаточного ресурса на основе интеллектуальных средств диагностики может быть представлена в виде комплекса показателей Приложение А (Таблица А.5) по результатам анализа публикаций ряда специалистов [88, 62, 117, 34].

Обобщенные показатели для управления надежностью и энергоэффективностью, представленные выше, являются информационно наполняемыми из различных систем, включающих как информационные системы верхнего уровня, так локальные системы автоматизации.

Целесообразно проводить исследования и настраивать контуры интеллектуального анализа и прогнозирования по приведенным показателям с учетом подходов, описанных в предыдущих главах. Одной из основных особенностей «цифрового двойника» является непрерывный мониторинг указанных показателей через оборудования ЭТК ГиНГП для извлечения своевременной и ранней информации, связанной с различными видами (типами) сбоев. Это позволит установить зависимости между энергоэффективностью и техническим состоянием, а также видов и уровней дефектов оборудования от изменения диагностических параметров различной физической природы и флуктуации внешних факторов и воздействий, обусловленных окружающей средой, на основе средств искусственного интеллекта.

4.7 Аналитические зависимости показателей энергоэффективности и надежности электромеханической подсистемы

Для методологического обоснования аналитической части наблюдений с целью отслеживания и сопоставления факторов необходимо на первоначальных этапах сформировать обобщающую модель суммарного потребления, которая в последствии привязывается к обобщенной схеме электроснабжения.

В условиях нефтегазодобывающих предприятий представим суммарное потребление электроэнергии ($W_{\text{нгдп}}$) как сумму следующих статей затрат (4.7.1).

$$W_{\text{нгдп}} = W_{\text{ппд}} + W_{\text{дс}} + W_{\text{ппн}} + W_{\text{днс}} + W_{\text{г}} + W_{\text{пг}} + W_{\text{сн}}, \quad (4.7.1)$$

где $W_{\text{ппд}}$ – электроэнергия, потребляемая системой ППД, кВт·ч;

$W_{\text{дс}}$ – электроэнергия, потребляемая электроприводами насосов добывающих скважин, кВт·ч;

$W_{\text{ппн}}$ – электроэнергия, потребляемая пунктами подготовки и сбора нефти, кВт·ч;

$W_{\text{днс}}$ – электроэнергия, потребляемая ДНС, кВт·ч;

$W_{\text{г}}$ – электроэнергия, расходуемая на компрессионирование газа, кВт·ч;

$W_{\text{пг}}$ – электроэнергия, расходуемая на внутрипромысловую перекачку газа, кВт·ч;

$W_{\text{сн}}$ – электроэнергия, потребляемая на собственные нужды, кВт·ч.

Функция зависимости электропотребления от времени и других показателей надежности для двух рассматриваемых подсистем выразим через формулу (4.7.2).

$$f(W_{\text{нгдп}}) = f(W_{\text{ппд}}, W_{\text{дс}}, W_{\text{ппн}}, W_{\text{днс}}, W_{\text{г}}, W_{\text{пг}}, W_{\text{сн}}, T_0, T_b, N_{\text{аг}}, N_{\text{ав}}, \Delta P_{\text{огр}}, P_{\text{факт}}, P_{\text{уст}}, \Delta K_{\text{гс}}, \rho_{\text{н}}, Q_{\text{ч}}, Q'_{\text{ч}}, T), \quad (4.7.2)$$

где $W_{\text{ппд}}$ – электроэнергия, потребляемая системой ППД, кВт·ч;

$W_{\text{дс}}$ – электроэнергия, потребляемая электроприводами насосов добывающих скважин, кВт·ч;

$W_{\text{ппн}}$ – электроэнергия, потребляемая пунктами подготовки и сбора нефти, кВт·ч;

$W_{\text{днс}}$ – электроэнергия, потребляемая ДНС, кВт·ч;

$W_{\text{г}}$ – электроэнергия, расходуемая на компрессионирование газа, кВт·ч;

$W_{\text{пг}}$ – электроэнергия, расходуемая на внутрипромысловую перекачку газа, кВт·ч;

$W_{\text{сн}}$ – электроэнергия, потребляемая на собственные нужды, кВт·ч;

T_0 – наработка между отказами, ч;

T_B – время восстановления, ч;

$\Delta K_{ГС}$ – коэффициент готовности системы (изменение);

$N_{аг}$ – количество агрегатов, работающих за время t , шт.;

$P_{факт}$ – фактическая мощность УЭЦН, кВт;

$N_{ав}$ – количество агрегатов, вышедших из строя за время t (вынужденный простой), шт.;

$P_{огр}$ – ограничение максимальной мощности потребителя НГ ДП, кВт;

$P_{уст}$ – установленная мощность УЭЦН, кВт;

ρ_n – средняя плотность нефти, кг/м³;

$Q_ч$ – часовой объемный дебит по жидкости, м³/ч;

$Q'_ч$ – часовой массовый дебит по нефти, т/ч;

T – время работы, ч.

На базе анализа и прогнозирования показателей энергоэффективности и надежности необходимо построение методологии оценки рисков. Оценка рисков базируется на количестве неблагоприятных событий, обусловленных превышением или выходом наблюдаемых параметров за сформированные коридоры допустимых, критических и предельных значений.

Представлены результаты (Таблица 4.7.1) развития неблагоприятных событий для двух подсистем (надежности и энергоэффективности) при следующих условиях:

– общее число неблагоприятных событий для каждой подсистемы принято, как $N_1 = 100$, $N_2 = 100$ (относительные единицы);

– доля от общего электропотребления предприятия для $W_{ппд} = 27\%$, $W_{дс} = 50\%$, $W_{днс} = 7\%$, $W_{г} = 5\%$, $W_{ппн} + W_{впг} + W_{сн} = 11$ (на основе данных статистических оценок предприятий).

Таблица 4.7.1 – Результаты развития неблагоприятных событий для двух подсистем на основе расчета вероятностей совместных событий для двух подсистем

Статьи затрат по суммарной электроэнергии НГДП	Подсистема №1 Энерго-эффективность		Подсистема №2 Электромеханика / Надежность		Общая подсистема	
	Вероятность неблагоприятного события на основе срыва потребления ээ, P(A)	Исходы	Вероятность неблагоприятного события в виде простоя с учетом вклада по количеству аварий в год, P(B)	Исходы	Вероятность совместного события, P(AB) для двух подсистем надежности и энергоэффективности	%
$W_{\text{пнд}}$ – электроэнергия, потребляемая системой ППД	0,27	27	0,25	25	0,068	6,8
$W_{\text{дс}}$ – электроэнергия, потребляемая электроприводами насосов добывающих скважин;	0,50	50	0,40	40	0,200	20,0
$W_{\text{пнн}}$ – электроэнергия, потребляемая пунктами подготовки и сбора нефти;	0,07	7	0,15	15	0,011	1,1
$W_{\text{днс}}$ – электроэнергия, потребляемая дожимными насосными станциями;	0,05	5	0,11	11	0,006	0,6
$W_{\text{г}}$ – электроэнергия, расходуемая на компрессионирование газа;						
$W_{\text{впг}}$ – электроэнергия, расходуемая на внутрипромысловую перекачку газа;	0,11	11	0,09	9	0,010	1,0
$W_{\text{сн}}$ – электроэнергия, потребляемая на собственные нужды						
Всего	100	100	1,00	100	0,293	29,3

Согласно таблице 4.7.1 можно сделать следующие выводы:

- наиболее высокая вероятность совместного неблагоприятного события наблюдается для электроприводов насосов добывающих скважин (0,2 или 20%) и для системы ППД (0,068 или 6,8%);
- наименьшая вероятность совместного неблагоприятного события наблюдается для дожимных насосных станций (0,006 или 0,6%).

Таким образом, последующие мероприятия в виде разработки алгоритмов прогнозирования для двух подсистем будут актуальны не только для всего ГиНГП, но и для наиболее аварийных с позиции возникновения аварийных ситуаций для подсистем №1 и №2 (система ППД, электроприводы насосов добывающих скважин). Возникновение аварии приведет к отклонению соответствующих значений на 29,3% при условиях, представленных выше.

Если рассмотреть несколько совместных событий (для нескольких подсистем), то представленные значения вероятностей возникновения совместного события будут представлены в виде теоремы умножения (для зависимых событий).

Вероятность совместного появления двух событий равна произведению вероятности одного из них на условную вероятность другого, вычисленную в предположении, что первое событие уже наступило.

Примем факт того, что для подсистемы №1 «Энергоэффективность», наступило неблагоприятное событие, тогда (4.7.3).

$$P(AB) = P(A) \cdot P_A(B), \quad (4.7.3)$$

где $P(AB)$ – вероятность возникновения совместного события для подсистемы №1 «Энергоэффективность» и №2 «Электромеханика/Надежность»;

$P_A(B)$ – условная вероятность в предположении того, что событие произошло в подсистеме №1 «Энергоэффективность».

С учетом анализа (Таблица 4.7.2) было принято решение рассматривать суммарные затраты электроэнергии для ГиНГП для наиболее весомых статей затрат (№1-4).

Матрица совместных неблагоприятных событий для двух подсистем (Таблица 4.7.3).

Таким образом, наиболее неблагоприятные события наблюдаются для двух подсистем в такой последовательности:

– ВВ1: Энергоэффективность (электроприводы насосов добывающих скважин)→ Электромеханика/Надежность (электроприводы насосов добывающих скважин);

– АВ1: Энергоэффективность (система ППД) Электромеханика/Надежность (электроприводы насосов добывающих скважин);

– ВА1: энергоэффективность (электроприводы насосов добывающих скважин) Электромеханика/Надежность (система ППД).

Таблица 4.7.2 – Анализ событий

Подсистема №1 «Энергоэффективность»	Событие	Подсистема №2 «Электромеханика/Надежность»	Событие
$W_{\text{ппд}}$ – электроэнергия, потребляемая системой ППД, кВт·ч;	А	$W_{\text{ппд}}$ – электроэнергия, потребляемая системой ППД, кВт·ч;	А1
$W_{\text{дс}}$ – электроэнергия, потребляемая электроприводами насосов добывающих скважин, кВт·ч;	В	$W_{\text{дс}}$ – электроэнергия, потребляемая электроприводами насосов добывающих скважин, кВт·ч;	В1
$W_{\text{ппн}}$ – электроэнергия, потребляемая пунктами подготовки и сбора нефти, кВт·ч;	С	$W_{\text{ппн}}$ – электроэнергия, потребляемая пунктами подготовки и сбора нефти, кВт·ч;	С1
$W_{\text{днс}}$ – электроэнергия, потребляемая ДНС, кВт·ч;	Д	$W_{\text{днс}}$ – электроэнергия, потребляемая ДНС, кВт·ч;	Д1

Таблица 4.7.3 – Матрица совместных неблагоприятных событий для двух подсистем

Подсистема №1 Энергоэффективность	Подсистема №2 Электромеханика, надежность			
	А1	В1	С1	Д1
А	0,068	0,109	0,041	0,030
В	0,126	0,202	0,076	0,056
С	0,018	0,028	0,011	0,008
Д	0,013	0,020	0,008	0,006

Построенный на базе предложенного подхода сервис по оценке, а в последствии прогнозированию рисков на основе анализа энергоэффективности и надежности является частью комплексной системы управления эффективной эксплуатацией всех единиц ЭМО на предприятии.

Обобщенный алгоритм:

- рассчитать суммарное потребление электроэнергии на НГДП по выделенным процессам/анализ электромеханического оборудования за выбранный интервал времени;
- оценить результаты развития неблагоприятных событий для двух подсистем (надежности и энергоэффективности) путем расчета вероятностей возникновения совместного события;
- выполнить классификацию событий с учетом частоты возникновения; сделать вывод на основе полученных значений (вероятности возникновения событий) с целью управления показателями надежности и энергоэффективности.

Таблица 4.7.4 – Классификация событий

Вид события	Вероятность возникновения		
	<i>P</i> (в долях единицы)	События	Описание
Слабая вероятность	От 0,006 до 0,011	DD1 CC1 CD1 DC1	Событие может произойти в редких случаях
Маловероятные	От 0,012 до 0,028	DA1 CA1 DB1 CB1	Редкое событие, ранее могло происходить
Вероятные	От 0,029 до 0,076	AD1 AC1 BD1 AA1 BC1	Предположение возможности того, что событие произойдет
Весьма вероятные	От 0,077 до 0,201	AB1 BA1	Событие может произойти
Почти возможные, частые	От 0,202 и выше	BB1	Событие, как ожидается, произойдет

4.8 Определение сценарных условий изменения электропотребления/электрических нагрузок от времени в изменяющихся условиях эксплуатации ЭТК ГиНГП

В изменяющихся условиях эксплуатации характерных для ГиНГП с учетом сохранения технологического цикла возникают следующие актуальные задачи:

- управление надежностью ЭТК объектов на ГиНГП;
- управление электропотреблением.

Решение данных задач включает в себя определение закона распределения случайной величины, характеризующей надежность ($P(t)$, $f(t)$, $\lambda(t)$ и др.), то есть соотношение, устанавливающее связь между значениями случайных величин и вероятностью их появления в соответствующий момент времени. Законы распределения устанавливаются на основе статистических данных предприятий. Цифровая трансформация позволит вести статистические базы данных на основе отслеживаемых и контролируемых параметров, по которым ЦД осуществляет интеллектуальный мониторинг. В результате получают по всему предприятию группированные или частные табличные или графические зависимости $P(t)$, $f(t)$, $\lambda(t)$ от времени. Для упрощения дальнейшего использования результатов испытаний в теории вероятностей, полученные соотношения аппроксимируют различными аналитическими зависимостями (экспоненциальный закон распределения, нормальный закон распределения, распределение Вэйбулла и др.).

Основные этапы алгоритма, определяющего и обновляющего закон распределения, базирующегося на обновляемых статистических данных в условиях группировки и перегруппировки статистических наборов:

- подготовка опытных данных;
- построение гистограммы и ее аппроксимация кривой;
- определение по виду кривой предварительных законов распределения;
- проверка соответствия выбранного закона опытным данным по одному из критериев (критерии Пирсона, Колмогорова и др.).

Результатом работы алгоритма является определение вида распределения. Для примера (Рисунок 4.8.1) представлен вид распределения функции $f(t)$.

Сравнивая функцию $\lambda(t)$ для второго периода с теоретическими законами распределения, легко заметить, что практическое распределение подчиняется экспоненциальному закону.

Определение показателей надежности системы для структуры из n последовательно соединенных элементов в соответствии с теоремой умножения вероятность безотказной работы равна (4.8.1).

$$P_c^{(n)} = P_1(t)P_2(t) \dots P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t). \quad (4.8.1)$$

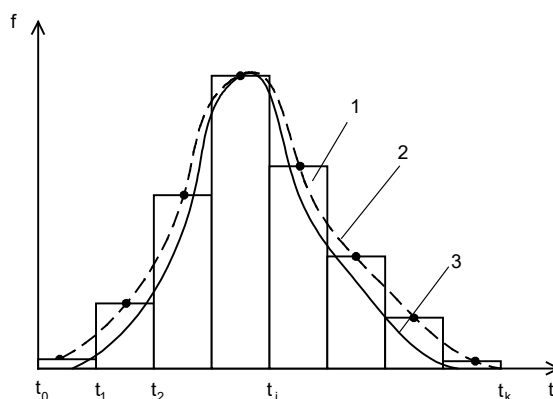


Рисунок 4.8.1 – Примерный вид распределения функции $f(t)$ 1-гистограмма; 2-полигон; 3- аппроксимирующая функция

Отсюда следует, что интенсивность отказов будет определяться как сумма интенсивностей отказов отдельных элементов системы. Данное утверждение справедливо только для экспоненциального закона распределения (4.8.2).

$$\lambda_c^{(n)} = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n. \quad (4.8.2)$$

Для других законов распределения формулы будут усложняться. Использование полученных моделей для расчета вручную очень проблематично, даже применяемые на сегодняшний день программные средства требуют определенных компетенций, времени и достаточно проблематично встраиваются в контуры непосредственного управления рисками на основе постоянно обновляющихся статистических данных. Применение платформенных решений и сервис ориентированной архитектуры позволит развернуть данное ПО в виде сервисной услуги в «облаке» с постоянно вычисляемыми искомыми выходными данными. Изменение интенсивности отказов $\lambda(t)$ большинства количества объектов описывается U-образной кривой (Рисунок 4.8.2) с учетом рассмотрения периодов: t_1 – приработка; t_2 – нормальная эксплуатация; t_3 – старение оборудования.

Для построения методологии формирования контура управления энергоэффективностью и надежностью необходимо учитывать изменения в состоянии оборудования на протяжении жизненного цикла и учитывать текущий период времени при определении и анализе потерь и технического состояния, производя корректирующие настройки для алгоритмов, построенных, к примеру, на основе ИНС.

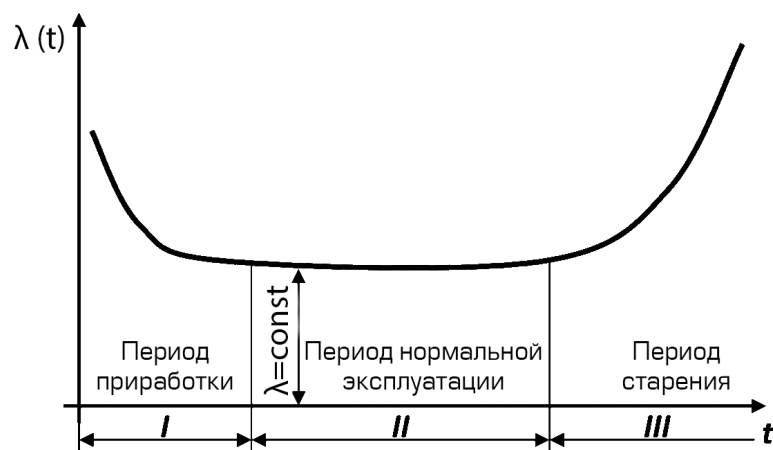


Рисунок 4.8.2 – Изменение интенсивности отказов от времени

Каждому периоду времени на протяжении жизненного цикла соответствует свой сценарий. Рассмотрим несколько сценариев развития (Таблица 4.8.1, Рисунок 4.8.2).

Для оценки различных сценариев развития для примера рассматривались профили изменения электрической нагрузки по активной мощности от времени для нефтегазодобывающего предприятия. В качестве базисного значения для (Рисунок 4.8.3 а) принято $P_{\text{баз1}} = 5566,1$ кВт, для (Рисунок 4.8.3 б) $P_{\text{баз2}} = 6006,2$ кВт, для (Рисунок 4.8.3 в) $P_{\text{баз3}} = 5566,1$ кВт (Рисунок 4.8.3 г) $P_{\text{баз3}} = 6907,2$ кВт.

Рассмотрение подхода по сценарным условиям изменения электропотребления/электрических нагрузок от времени в изменяющихся условиях эксплуатации электротехнических комплексов добычи нефти позволяет:

- производить мониторинг показателей для двух подсистем (электромеханика/надежность и энергоэффективность);
- разрабатывать методики по прогнозированию основных показателей;

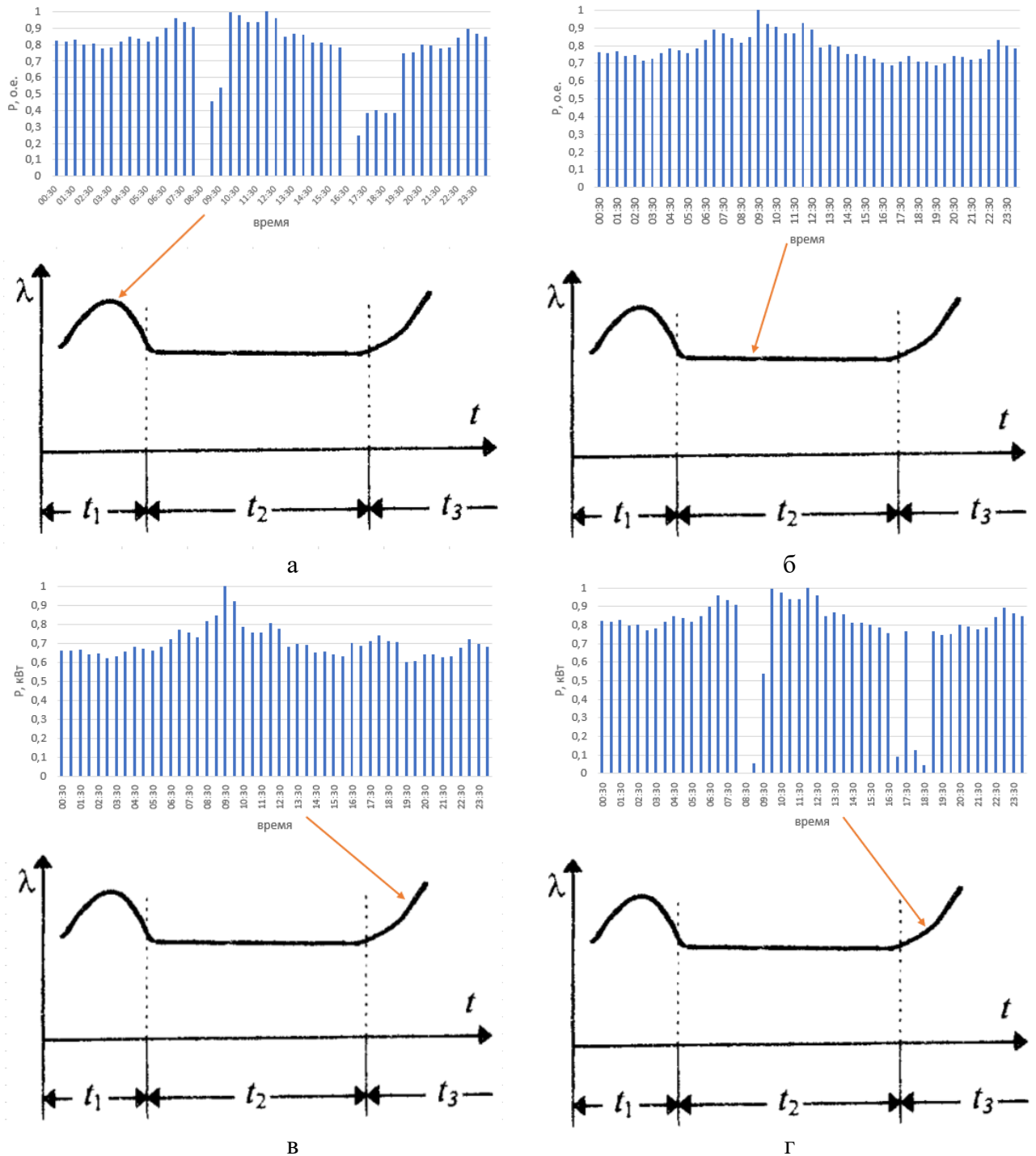


Рисунок 4.8.3 – Сценарий изменения электрической нагрузки: а – №1 (приработка t_1) $K_{max} = 1,05$, $K_{\phi} = 1,05$; б – №2 (нормальная эксплуатация t_2) $K_{max} = 1,27$, $K_{\phi} = 1,01$; в – №3 (старение оборудования t_3) $K_{max} = 1,32$, $K_{\phi} = 1,05$; г – №3 (старение оборудования t_3) $K_{max} = 1,42$, $K_{\phi} = 0,99$

- осуществлять проверку соответствия требований надежности и требований ГиНГП;
- определять значимость элементов;
- использовать результаты моделирования для оптимизации ремонтов на базе «цифрового двойника»;

– разрабатывать методики и программы по повышению надежности и энергосбережению в системах электроснабжения электротехнических комплексов для ГиНГП.

Таблица 4.8.1 – Характеристики подсистем с учетом сценариев развития и U -образной кривой

Время	Подсистема электромеханики/ надежности	Подсистема энергоэффективности	Риски
Приработка t_1	За этот период происходит наибольшее число отказов, вызванных в основном скрытыми дефектами, небрежностью монтажа. Возникают отказы, связанные с кратковременной перегрузкой деталей, технологическими, производственными и монтажными дефектами	Характеризуется снижением электропотребления (электрической нагрузки) отдельными агрегатами, простоями (рис. 5.4а)	Выше среднего риск
Нормальная эксплуатация t_2	В этот период число отказов уменьшается, а сами отказы носят случайный характер. Величина $\lambda(t)$ остается постоянной	Изменение электропотребления оборудования происходит по нормальному закону с учетом изменения основных показателей надежности оборудования. Продолжительность периода t_2 ограничивается износом отдельных элементов (рис. 5.4б).	Средний риск
Старение оборудования t_3	Повышенный износ и усталость оборудования. В этот период величина $\lambda(t)$ возрастает многократно. Проведение различных ремонтов оборудования	Изменение графика электропотребления (электрической нагрузки) от времени в результате старения оборудования возможно по двум сценариям, характеризующимся: повышенными значениями электропотребления, связанными с потерями мощности: в клапанах насоса; расходуемой на преодоление механического трения штанг; на преодоление гидродинамического трения штанг; на трение плунжера в цилиндре насоса; в элементах СК; в редукторе; ЭД; снижение электропотребления в виде массового простоя, вызванного периодическими отказами оборудования (рис.5.4в).	Высокий риск

Прогнозирование технического состояния и показателей энергоэффективности связано с изменением рисков недоотпуска электроэнергии, по которому также необходимо вести мониторинг и оценку для создания контура

управления. Риски в отношении недоотпуска электрической энергии можно представить в виде учета следующих составляющих (Таблица 4.8.2).

Таблица 4.8.2 – Составляющие для определения рисков от недоотпуска электроэнергии на базе «цифрового двойника»

Наименование	Обозначение
Ущерб от внезапности нарушения электроснабжения $\Delta Z_{\text{ущвн}}$, вызванного расстройством технологического процесса, повреждением основного оборудования и тд	$\Delta Z_{\text{ущ}}$
Оплата за простой производственного персонала за время нарушения электроснабжения $\Delta I_{\text{з.п.}}$, зависящий от глубины ограничения нагрузки и его длительности $\tau_{\text{ав}}$, количества простаивающих рабочих, их квалификации возможности временного использования на других производственных участках	$\Delta I_{\text{з.п.}}$
Суммарный ущерб предприятию в аварийном режиме	$\Delta Z_{\text{ущ ав}}$

4.9 Сценарная оценка потерь электрической энергии на стадии эксплуатации жизненного цикла ЭМО

Рассмотрим по трем сценариям на примере ГиНГП оценку основных показателей (суммарные потери, номинальный КПД, расчетный КПД, долю суммарных потерь (надёжность/электромеханика) от общей нагрузки, %). На рисунке 4.9.1 представлена упрощенная схема питания УЭЦН от кустовой двухтрансформаторной подстанции 6(10)/0,4 кВ, которая может включать в себя ПЭД различной мощности. Для целей нашего исследования был выполнен анализ для $N = 100$ ПЭД мощностью от 14 до 70 кВт.

Для трех сценариев были получены расчетные значения (Таблица 4.9.1 – Таблица 4.9.3). За этот период происходит наибольшее число отказов, вызванных в основном браком и небрежностью монтажа. Возникают отказы, связанные с кратковременной перегрузкой деталей, технологическими, производственными и монтажными дефектами

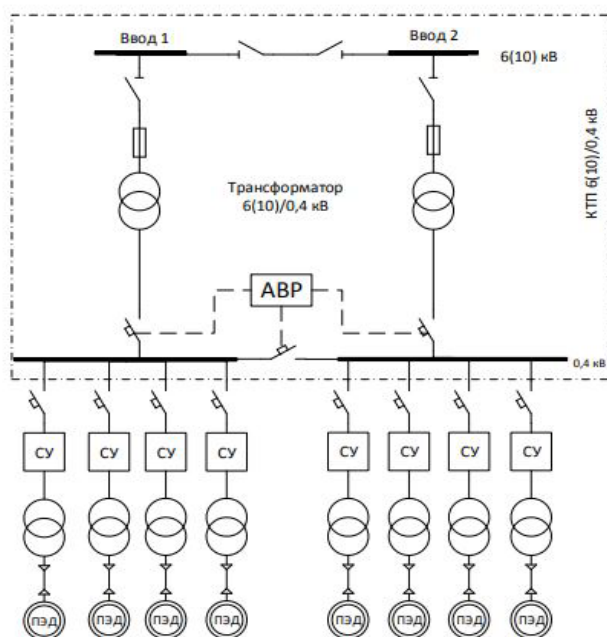


Рисунок 4.9.1 – Упрощенная схема питания УЭЦН от кустовой двухтрансформаторной подстанции 6(10)/0,4 кВ

За этот период происходит наибольшее число отказов, вызванных в основном браком и небрежностью монтажа. Возникают отказы, связанные с кратковременной перегрузкой деталей, технологическими, производственными и монтажными дефектами.

Таблица 4.9.1 – Сценарий №1 (приработка t_1)

ПЭД	N	Суммарные потери, Р, Вт	Электропотребление, W, кВт*ч (месяц)	Суммарные потери, Р, кВт (год)	Доля суммарных потерь (надежность/электро механика) от общей нагрузки, %
ПЭД14-103В5	40	81 478	4 324 320	29 740	14,9
ПЭД20-103В5	10	24 027	1 425 600	8 770	17,2
ПЭД50-103В5	25	129 218	9 504 000	47 164	36,9
ПЭД70-103В5	25	191 187	13 305 600	69 783	54,6
Итого	100	425910,5	28 559 520	155 457	30,9

Анализ потерь для АД был осуществлен с учетом принятых расчетных формул для энергетических диаграмм [37]. В расчете в дальнейшем полученные значения указаны для единичной мощности АД.

Таблица 4.9.2 – Сценарий №2 (нормальная эксплуатация t_2)

ПЭД	N	Суммарные потери, Р, Вт	Электропотребление, W, кВт*ч (месяц)	Суммарные потери, Р, кВт (год)	Доля суммарных потерь (надежность/электро механика) от общей нагрузки, %
ПЭД14-103В5	40	82 388	4 435 200	30 071	14,7
ПЭД20-103В5	10	24 369	1 584 000	8 895	17,4
ПЭД50-103В5	25	132 932	9 900 000	48 520	38,0
ПЭД70-103В5	25	193 441	13 860 000	70 606	55,3
Итого	100	433129,3	29 779 200	158 092	31,3

Таблица 4.9.3 – Сценарий №3 (старение оборудования t_3)

ПЭД	N	Суммарные потери, Р, Вт	Электропотребление, W, кВт*ч (месяц)	Суммарные потери, Р, кВт (год)	Доля суммарных потерь (надежность/электро механика) от общей нагрузки, %
ПЭД14-103В5	40	96 354	4 324 320	35 169	17,6
ПЭД20-103В5	10	27 449	1 425 600	10 019	21,8
ПЭД50-103В5	25	138 695	9 108 000	50 624	43,1
ПЭД70-103В5	25	202 636	12 751 200	73 962	62,9
Итого	100	465134,1	27 609 120	169 774	36,4

Таблица 4.9.4 – Анализ потерь для ПЭД50-103В5 по трем сценариям

Составляющие	Сценарий №1, приработка t ₁	Сценарий №2, нормальная эксплуатация t ₂	Сценарий №3, старение t ₃
Добавочные потери, Вт, P _{доб}	250,0	250,0	250,0
КПД	0,897	0,894	0,889
Электрические потери в обмотке ротора, Вт, P _{э2}	2529,9	2521,6	2521,6
Электрические потери в обмотке статора, P _{э1} , Вт	2000,8	2157,7	2157,7
Электромагнитная мощность двигателя, P _{э1} , Вт	2000,8	2157,7	2157,7
Суммарные потери, Вт, P	5168,7	5317,3	5547,8

Таблица 4.9.5 – Анализ потерь для ПЭД70-103В5 по трем сценариям

Составляющие	Сценарий №1, приработка t ₁	Сценарий №2, нормальная эксплуатация t ₂	Сценарий №3, старение t ₃
Добавочные потери, Вт, P _{доб}	350,0	350,0	350,0
КПД	0,891	0,889	0,884
Электрические потери в обмотке ротора, Вт, P _{э2}	4152,6	4146,7	4137,6
Электрические потери в обмотке статора, P _{э1} , Вт	2756,8	2853,0	2999,3
Электромагнитная мощность двигателя, P _{э1} , Вт	2756,8	2853,0	2999,3
Суммарные потери, Вт, P	7647,5	7737,7	8105,4

Таблица 4.9.6 – Риски для подсистемы надежность/энергоэффективность за месяц

Название	Кол-во раб/кол- во неработа ющих	Потери, кВт	КПД расчет (эксплуа тация)	Недоотпуск электроэне ргии в рез- те простоя кВт*ч	Стоимость ээ, руб. (риск 1)	Стоим ость нефти для оптовых цен, руб. (риск 2)
ПЭД14-103В5 (сценарий 1 приработка)	8 / 7 нер	14,259	85,5	36 540	164 430,00	2 322 210,00
ПЭД14-103В5 (сценарий 2 нормальная эксплуатация)	8 / 8 р	16,48	85,3	36 540	164 430	2 322 210,00
ПЭД14-103В5 (сценарий 3 старение)	8 / 4 р	9,636	82,8	55 440	249 480	9 288 840,00

Сценарная оценка уровня потерь электрической энергии позволяет:

- контролировать на разных стадиях эксплуатации жизненного цикла ЭМО работу путем анализа влияния показателей энергоэффективности на показатели надежности и наоборот;
- производить управляющие воздействия на процесс работы ЭМО путем анализа уровня потерь электрической энергии при выявлении неблагоприятных событий в рамках работы ГиНПП (развитие аварий, технологических нарушений);
- уменьшать риски на уровне работы отдельных предприятий с сохранением плановых объемов по добыче нефти за рассмотренный интервал времени (условие технологического цикла);
- контролировать показатели энергоэффективности по добыче нефти (стратегии компаний), выполняя программы/стратегии по энергосбережению в рамках ISO энергоменеджмента и отдельных программ по ремонту (программы по ТОиР);
- включать в программу разработку таких мероприятий по энергосбережению и энергоэффективности, которые будут увеличивать показатели надежности (коэффициент готовности системы), уменьшать время по восстановлению системы (T_B) и параметр отказов в год.

4.10 Оценка рисков и уровня потерь электрической энергии

В ходе работы асинхронных двигателей до 2 МВт был произведен анализ их работы с позиции применения обобщенной классификации, рассмотренной в главе 1, на основе выявленных дефектов.

Потери электрической энергии в зависимости от выявленных дефектов (для 100 выявленных зафиксированных случаев ($K_{АД}$) из 100 количества анализируемых АД $N_{АД}=100$) (Рисунок 4.10.1).

Расчетные данные для АД по количеству зафиксированных случаев дефектов ($K_{АДi}$, шт.), вероятностям возникновения (p_i , %), последствиям – потерям электроэнергии ($\Delta P_{АДi}$, %), рискам (R_i) (Таблица 4.10.1).

Таблица 4.10.1 – Расчетные данные (приработка), время наблюдения t_1

Дефект	Количество зафиксированных случаев дефектов, шт. (К АД _i)	Вероятность, р _i , %	Последствия, потери электроэнергии (ΔP _{АД_i} , %)	Риск, R _i
Подшипник	22	22	18	3,96
Межвитковая изоляция	9	9	61	5,49
Разрыв стержней ротора	15	15	8	1,20
Несоосность валов	12	12	5	0,60
Кавитация насоса	8	8	1	0,08
Внешней раковины	5	5	1	0,05
Лопастей	6	6	2	0,12
Пробой силовых ключей	5	5	0,5	0,03
Потеря управления силовыми ключами	7	7	0,5	0,04
Нарушения охлаждения	6	6	2	0,12
Короткие замыкания (межфазное, межвитковое, на корпус)	5	5	1	0,05
Итого	100	100	100	11,7

Матрица оценки рисков для АД в зависимости от вероятности возникновения дефектов и потерь электроэнергии, разбитая на 5 уровней (Таблица 4.10.2).

Таблица 4.10.2 – Матрица оценки рисков для АД в зависимости от вероятности возникновения дефектов и потерь электроэнергии

Вероятность возникновения дефекта	Уровень потерь электроэнергии для АД, %				
	0-12,2 (незначительная 1)	12,3-24,4 (невысокая 2)	24,5-36,6 (умеренная 3)	36,7-48,8 (значительная 4)	от 48,9 и выше (сильная 5)
0-20 (уровень 1)	Очень низкий 2	Очень низкий 3	Низкий 4	Средний 5	Средний 6
21-40 (уровень 2)	Очень низкий 3	Низкий 4	Средний 5	Средний 6	Высокий 7
41-60 (уровень 3)	Низкий 4	Средний 5	Средний 6	Высокий 7	Очень высокий 8
61-80 (уровень 4)	Средний 5	Средний 6	Высокий 7	Очень высокий	Очень высокий 9
81-100 (уровень 5)	Средний 6	Высокий 7	Очень высокий 8	Очень высокий 9	Очень высокий 10

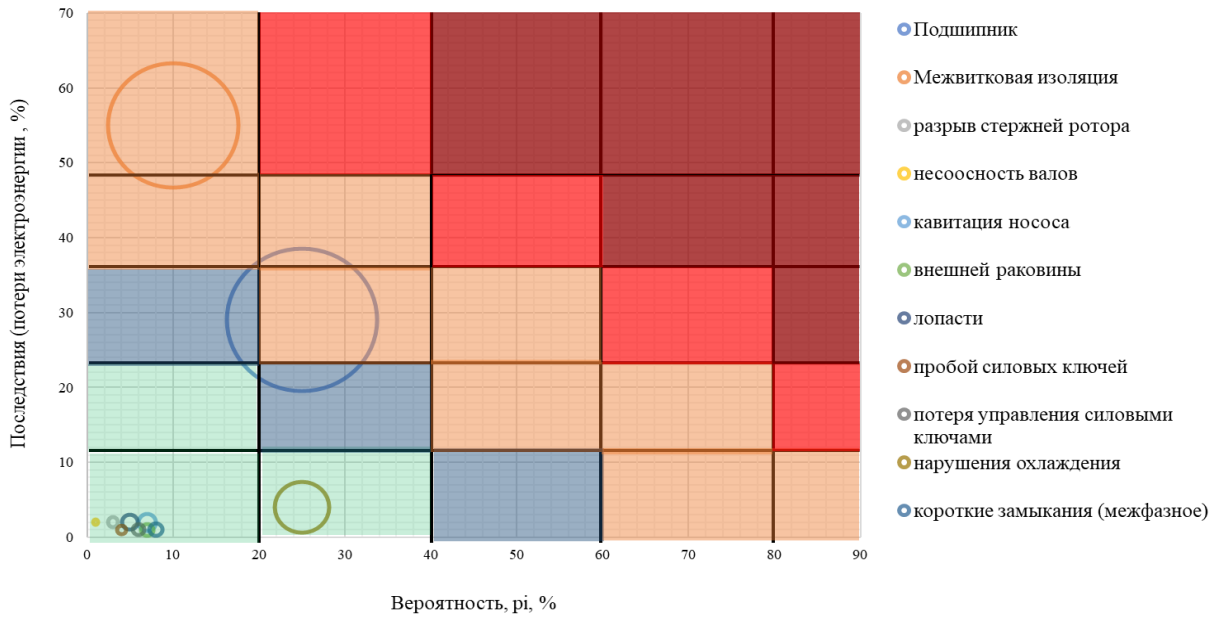


Рисунок 4.10.1 – Изменение потерь электроэнергии от вероятности возникновения дефектов для выбранных АД (приработка, время наблюдения t_1)

На рисунке 4.10.2 показан график изменения суммарных рисков от вероятности возникновения дефектов для выбранных АД (приработка, время наблюдения t_1).



Рисунок 4.10.2 – Изменение суммарных рисков от вероятности возникновения дефектов для выбранных АД (приработка, время наблюдения t_1)

Таблица 4.10.3 – Расчетные данные (нормальная эксплуатация), время наблюдения t_2

Дефект	Количество зафиксированных случаев дефектов, шт. ($K_{Ад}$)	Вероятность, p_i , %	Последствия (потери электроэнергии $\Delta P_{Ад}$, %)	Риск, R_i
Подшипник	11	22	9	1,98
Межвитковая изоляция	5	9	30,5	2,75
Разрыв стержней ротора	8	15	4	0,60
Несоосность валов	6	12	2,5	0,30
Кавитация насоса	4	8	0,5	0,04
Внешней раковины	3	5	0,5	0,03
Лопастей	3	6	1	0,06
Пробой силовых ключей	3	5	0,25	0,01
Потеря управления силовыми ключами	4	7	0,25	0,02
Нарушения охлаждения	3	6	1	0,06
Короткие замыкания (межфазное, межвитковое, на корпус)	3	5	0,5	0,03
Итого	50	100	50	5,9

Матрица оценки рисков для АД в зависимости от вероятности возникновения дефектов и потерь электроэнергии, разбитая на 5 уровней (Таблица 4.10.4).

Таблица 4.10.4 – Матрица оценки рисков для АД в зависимости от вероятности возникновения дефектов и потерь электроэнергии

Вероятность возникновения дефекта	Уровень потерь электроэнергии для АД, %				
	0-6,1 (незначительная 1)	6,2-12,2 (невысокая 2)	12,3-18,3 (умеренная 3)	18,4-24,4 (значительная 4)	от 24,5 и выше (сильная 5)
0-20 (уровень 1)	Очень низкий 2	Очень низкий 3	Низкий 4	Средний 5	Средний 6
21-40 (уровень 2)	Очень низкий 3	Низкий 4	Средний 5	Средний 6	Высокий 7
41-60 (уровень 3)	Низкий 4	Средний 5	Средний 6	Высокий 7	Очень высокий 8
61-80 (уровень 4)	Средний 5	Средний 6	Высокий 7	Очень высокий	Очень высокий 9
81-100 (уровень 5)	Средний 6	Высокий 7	Очень высокий 8	Очень высокий 9	Очень высокий 10

В таблице 4.10.2 представлен график изменения потерь электроэнергии от вероятности возникновения дефектов для выбранных АД (нормальная эксплуатация, время наблюдения t_2).

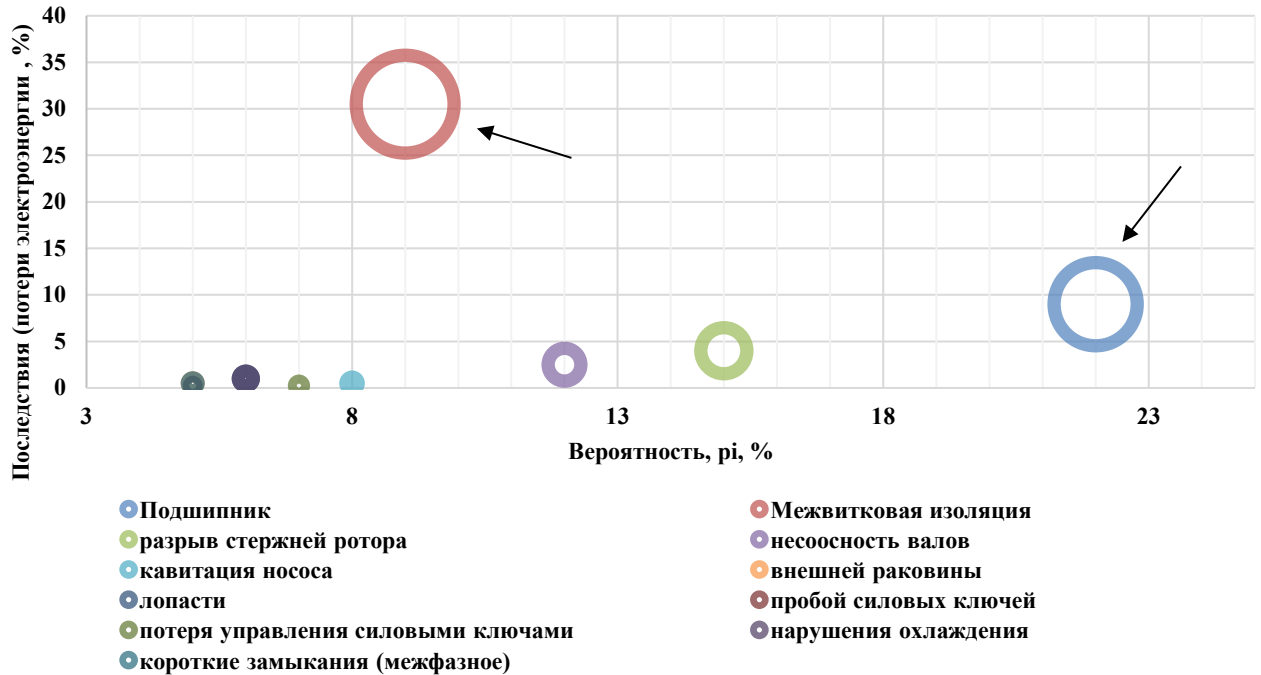


Рисунок 4.10.3 – Изменение потерь электроэнергии от вероятности возникновения дефектов для выбранных АД (нормальная эксплуатация, время наблюдения t_2)

На рисунке 4.10.4 показан график изменения суммарных рисков от вероятности возникновения дефектов для выбранных АД (нормальная эксплуатация, время наблюдения t_2).

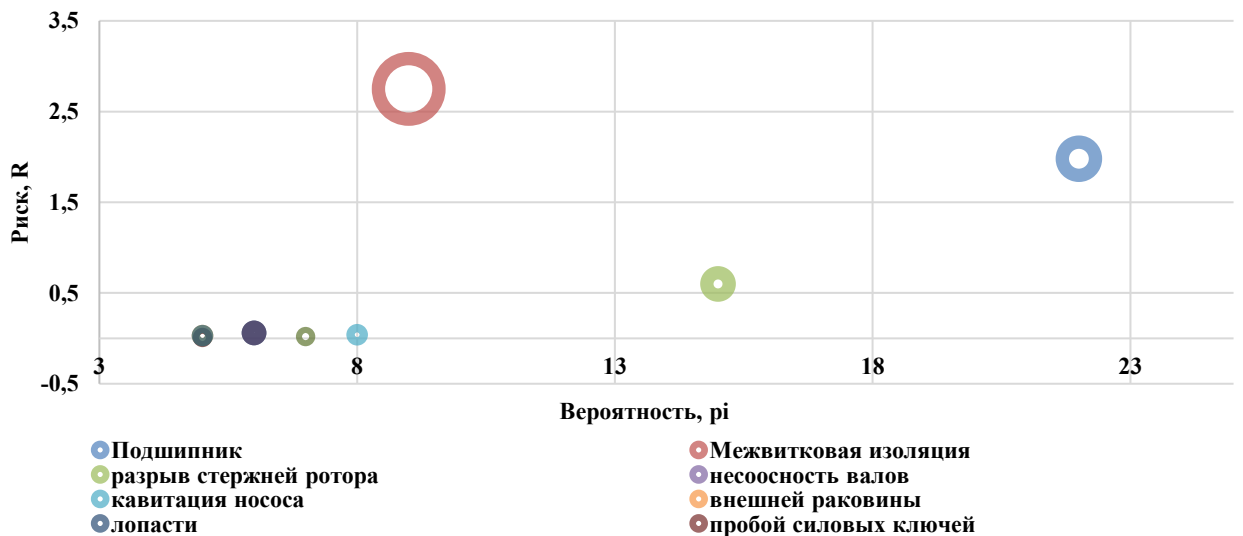


Рисунок 4.10.4 – Изменение суммарных рисков от вероятности возникновения дефектов для выбранных АД (нормальная эксплуатация, время наблюдения t_2)

В ходе анализа изменения потерь электроэнергии от вероятности возникновения дефектов для выбранных АД (нормальная эксплуатация, время наблюдения t_2) были получены следующие выводы:

- суммарный риск для рассматриваемых АД на примере НГДП составляет $R_{АД}=5,9$;
- обратить повышенное внимание на выявленные дефекты по подшипникам ($R_i=1,98$), продолжать осуществлять контроль с учетом вероятности возникновения дефекта (уровень 2) и выявленных потерь электроэнергии для АД (%) для уровня (низкий 4) с целью недопущения перехода на следующий уровень (средний 5) согласно таблице 4.10.3;
- обратить повышенное внимание на выявленные дефекты для межвитковой изоляции ($R_i=2,75$), продолжать осуществлять контроль с учетом вероятности возникновения дефекта (уровень 1) и выявленных потерь электроэнергии для АД (%) для уровня (средний 6) с целью недопущения перехода на следующий уровень (высокий 7) согласно таблице 4.10.3;
- продолжать контролировать и анализировать другие типы дефектов на основе полученных значений и графиков с целью снижения перехода на следующий уровень в зависимости как от потерь электроэнергии, так и от вероятности возникновения дефектов для анализируемых АД.

Старение

В таблице 4.10.5 представлены расчетные данные для АД по количеству зафиксированных случаев дефектов ($K_{АДi}$, шт), вероятностям возникновения (p_i , %), последствиям – потерям электроэнергии ($\Delta P_{АДi}$, %), рискам (R_i).

Таблица 4.10.5 – Расчетные данные (старение), время наблюдения t_3

Дефект	Количество зафиксированных случаев дефектов, шт. ($K_{АДi}$)	Вероятность, p_i , %	Последствия (потери электроэнергии $\Delta P_{АДi}$, %)	Риск, R_i
Подшипник	30	25	29	7,25
Межвитковая изоляция	12	10	55	5,50

Продолжение таблицы 4.10.5

Разрыв стержней ротора	3	3	2	0,05
Несоосность валов	1	1	2	0,02
Кавитация насоса	8	7	2	0,13
Внешней раковины	8	7	1	0,07
Лопастей	6	5	2	0,10
Пробой силовых ключей	5	4	1	0,04
Потеря управления силовыми ключами	7	6	1	0,06
Нарушения охлаждения	30	25	4	1,00
Короткие замыкания (межфазное, межвитковое, на корпус)	10	8	1	0,08
Итого	120	100	100	14,3

В таблице 4.10.6 представлена матрица оценки рисков для АД в зависимости от вероятности возникновения дефектов и потерь электроэнергии, разбитая на 5 уровней.

Таблица 4.10.6 – Матрица оценки рисков для АД в зависимости от вероятности возникновения дефектов и потерь электроэнергии

Вероятность возникновения дефекта	Уровень потерь электроэнергии для АД, %				
	0-11 (незначительная 1)	11,1-22 (невысокая 2)	22,1-33 (умеренная 3)	33,1-44 (значительная 4)	От 44,1 и выше (сильная 5)
0-20 (уровень 1)	Очень низкий 2	Очень низкий 3	Низкий 4	Средний 5	Средний 6
21-40 (уровень 2)	Очень низкий 3	Низкий 4	Средний 5	Средний 6	Высокий 7
41-60 (уровень 3)	Низкий 4	Средний 5	Средний 6	Высокий 7	Очень высокий 8
61-80 (уровень 4)	Средний 5	Средний 6	Высокий 7	Очень высокий	Очень высокий 9
81-100 (уровень 5)	Средний 6	Высокий 7	Очень высокий 8	Очень высокий 9	Очень высокий 10

На рисунке 4.10.5 представлен график изменения потерь электроэнергии от вероятности возникновения дефектов для выбранных АД (старение, время наблюдения t_3).

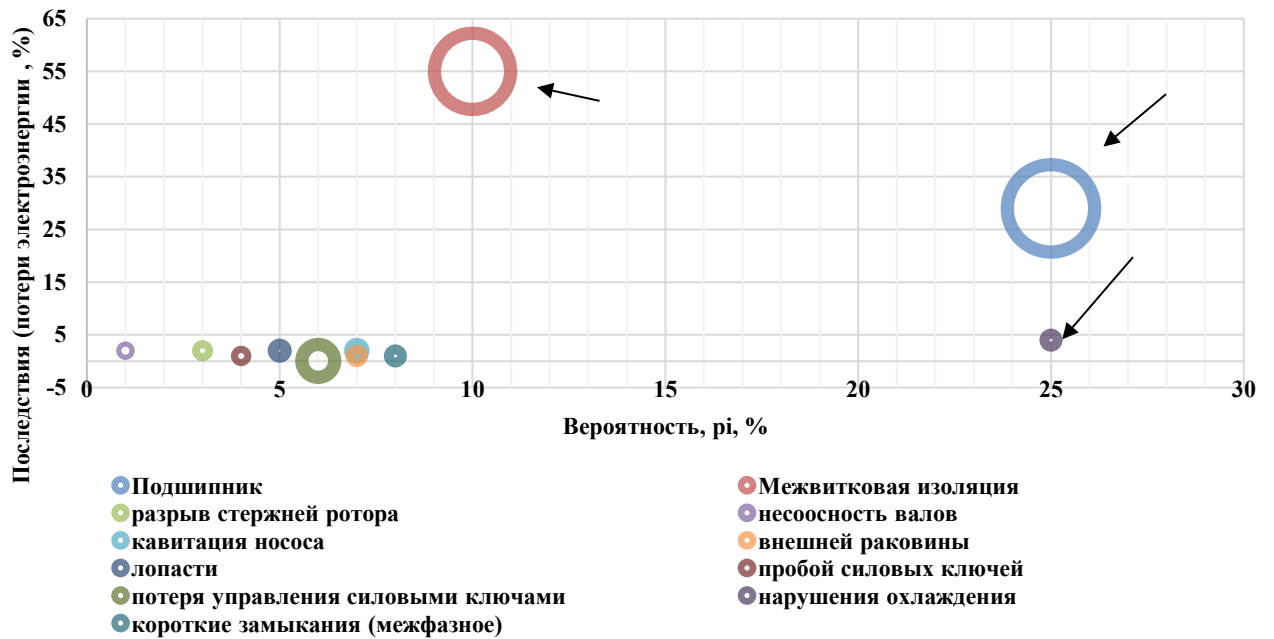


Рисунок 4.10.5 – Изменение потерь электроэнергии от вероятности возникновения дефектов для выбранных АД (старение, время наблюдения t_3)

На рисунке 4.10.6 показан график изменения суммарных рисков от вероятности возникновения дефектов для выбранных АД (старение, время наблюдения t_3).

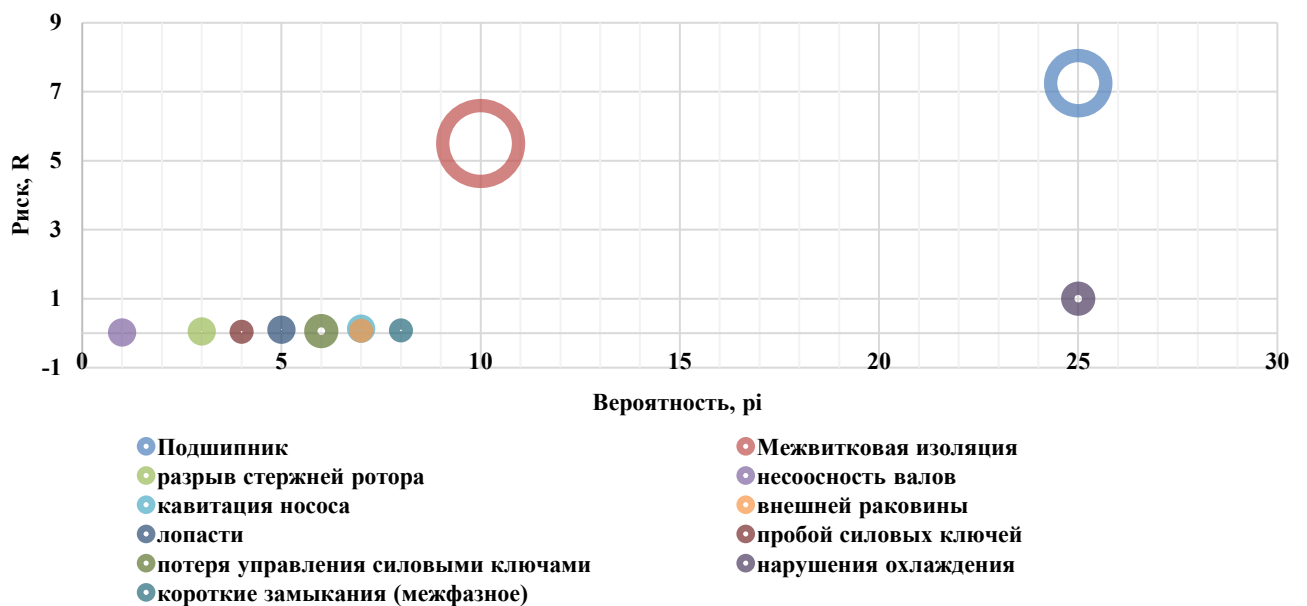


Рисунок 4.10.6 – Изменение суммарных рисков от вероятности возникновения дефектов для выбранных АД (старение, время наблюдения t_3)

В ходе анализа изменения потерь электроэнергии от вероятности возникновения дефектов для выбранных АД (старение, время наблюдения t_3) были получены следующие выводы:

– суммарный риск для рассматриваемых АД на примере ГиНГП составляет $R_{АД}=14,3$;

– обратить повышенное внимание на выявленные дефекты для межвитковой изоляции ($R_i=5,5$);

– продолжать осуществлять контроль с учетом вероятности возникновения дефекта (уровень 1) и выявленных потерь электроэнергии для АД (%) для уровня (средний 6) с целью недопущения перехода на следующий уровень (высокий 7) согласно таблице 4.10.5;

– обратить повышенное внимание на выявленные дефекты по подшипникам ($R_i=7,25$);

– продолжать осуществлять контроль с учетом вероятности возникновения дефекта (уровень 2) и выявленных потерь электроэнергии для АД (%) для уровня (средний 5) с целью недопущения перехода на следующий уровень (средний 6) согласно таблице 4.10.5;

– обратить внимание на выявленные дефекты по нарушению охлаждения ($R_i=1$), продолжать осуществлять контроль с учетом вероятности возникновения дефекта (уровень 2) и выявленных потерь электроэнергии для АД (%) для уровня (очень низкий 3) с целью недопущения перехода на следующий уровень (средний 5) согласно таблице 4.10.5;

– продолжать контролировать и анализировать другие типы дефектов на основе полученных значений и графиков с целью снижения перехода на следующий уровень в зависимости как от потерь электроэнергии, так и от вероятности возникновения дефектов для анализируемых АД.

Обобщенный алгоритм расчета оценки уровня потерь в подсистеме/надежность энергоэффективность и управление рисками.

Основные этапы:

1. Зафиксировать количество случаев дефектов (K_{AD}) из выбранного количества рассмотренных АД (N_{AD}) с учетом наработки (ч) для трех рассмотренных участков (приработка t_1 , нормальная эксплуатация t_2 старение t_3).

2. Произвести расчет вероятности (p_i , %) возникновения наблюдаемого дефекта(-ов) по формуле (4.10.1).

$$p_i = \frac{K_{AD_i}}{\sum_I^N K_{AD_i}}, \quad (4.10.1)$$

где K_{AD_i} – количество зафиксированных дефектов, шт.;

$\sum_I^N K_{AD_i}$ – общее количество зафиксированных дефектов, шт. для выбранных АД для рассмотренной классификации.

3. Произвести расчет потерь электрической энергии (ΔP_{AD_i}) для анализируемых типов дефектов.

4. Рассчитать риски для выявленных дефектов АД (R_i) по формуле (4.10.2).

$$R_i = p_i \cdot \Delta P_{AD_i}, \quad (4.10.2)$$

где p_i – вероятность возникновения дефекта(-ов) для АД;

ΔP_{AD_i} – последствия (потери электроэнергии, % для наблюдаемого дефекта(-ов) для АД);

5. Рассчитать суммарные риски для всех дефектов R_{AD} по формуле (4.10.3).

$$R_{AD} = \sum_i^N R_i = \sum_i^N p_i \cdot \Delta P_{AD_i}, \quad (4.10.3)$$

где R_i – риски для выявленных дефектов АД;

N – количество выявленных дефектов для АД.

6. Построить матрицы оценки рисков для АД в зависимости от вероятности возникновения дефектов и потерь электроэнергии.

7. Построить графики изменения суммарных рисков от вероятности возникновения дефектов для выбранных АД (для $t_1 - t_3$).

8. Сделать выводы по отдельным зонам для управления и проведения последующей диагностики оборудования.

4.11 Модель оценки стоимости жизненного цикла эксплуатации ЭМО

Техническая эксплуатация – наиболее длительная стадия жизненного цикла и одновременно самая дорогостоящая, поскольку включает потребление энергии на протяжении всего срока службы и меры по поддержанию работоспособности машины. Ввиду средней продолжительности срока службы ЭМО на ГиНГП от 10 до 25 лет, необходимо в оценке стоимости жизненного цикла учитывать фактор временной стоимости денег и потенциальный рост стоимости электроэнергии. При прогнозировании технического воздействия необходимо учитывать приведенную нагрузку ЭМО, которая может быть получена из производственного плана или спрогнозирована на основе данных предыдущих периодов. Таким образом, для построения системы принятия решения по воздействию на план ТОиР, предлагается модель оценки стоимости жизненного цикла эксплуатации (СЖЦЭ), учитывающая режим работы двигателя, потери, обусловленные нагрузкой, конструктивными особенностями и техническим состоянием, а также стоимость потребляемой электроэнергии, стоимость эквивалентных выбросов CO_2 на протяжении жизненного цикла и стоимость обслуживания машины (4.11.1).

$$\begin{aligned} \text{СЖЦЭ}_{\text{ЭМО}} = & -I - (E_M + E_{M_{\text{ТС}}} + E'_L + E'_{L_{\text{ТС}}}) \cdot p_E \cdot k_{p1} - C_{MRO} \cdot k_{p2} \\ & - (E_{\text{CO}_2} + E_{\text{CO}_2_{\text{ТС}}}) \cdot p_{\text{CO}_2} - C_D + V_R, \end{aligned} \quad (4.11.1)$$

где I – первоначальные инвестиции (покупка двигателя);

E_M, E'_L – потребленная двигателем энергия механическая и электрическая;

$E_{M_{\text{ТС}}}, E'_{L_{\text{ТС}}}$ – дополнительное потребление механической и электрической энергии с учётом потерь на ТС;

p_E – стоимость электроэнергии;

C_{MRO} – стоимость обслуживания;

k_{p1}, k_{p2} – коэффициенты кумулятивной приведенной стоимости при изменении цены на электроэнергию и обслуживание соответственно;

$E_{\text{CO}_2}, p_{\text{CO}_2}$ эквивалентное количество и стоимость выбросов CO_2 ;

E_{CO_2TC} – эквивалентное количество выбросов CO_2 обусловленных техническим состоянием;

C_D, V_R – стоимость вывода из эксплуатации и прибыль от утилизации.

Для отслеживаемой единицы ЭМО определяется механическая нагрузка, значение варьируемых параметров для определения текущей базовой кривой $СЖЦЭ_{ЭМО}$ без учета выявленных потерь E_{MTC}, E'_{LTC} и определения E_{CO_2TC} . При этом следующие переменные являются варьируемыми в режиме реального времени, на основе систем мониторинга и диагностики: уровень потерь, обусловленных техническим состоянием, цена на электроэнергию, цена на выбросы CO_2 , ставка дисконтирования, диапазон сдвига плана ТОиР, выраженный в процентном отношении как в большую, так и меньшую сторону относительно исходного плана ТОиР, определяемого системой планово-предупредительного ремонта.

Рассмотрение подхода по сценарным условиям изменения электропотребления/электрических нагрузок от времени с учетом этапа жизненного цикла эксплуатации ЭТК и ТС ЭМО в изменяющихся условиях эксплуатации электротехнических комплексов ГиНПП позволяет оценивать уровень потерь электроэнергии и вредных выбросов, обусловленных ТС ЭМО и планировать время и объем технических воздействий.

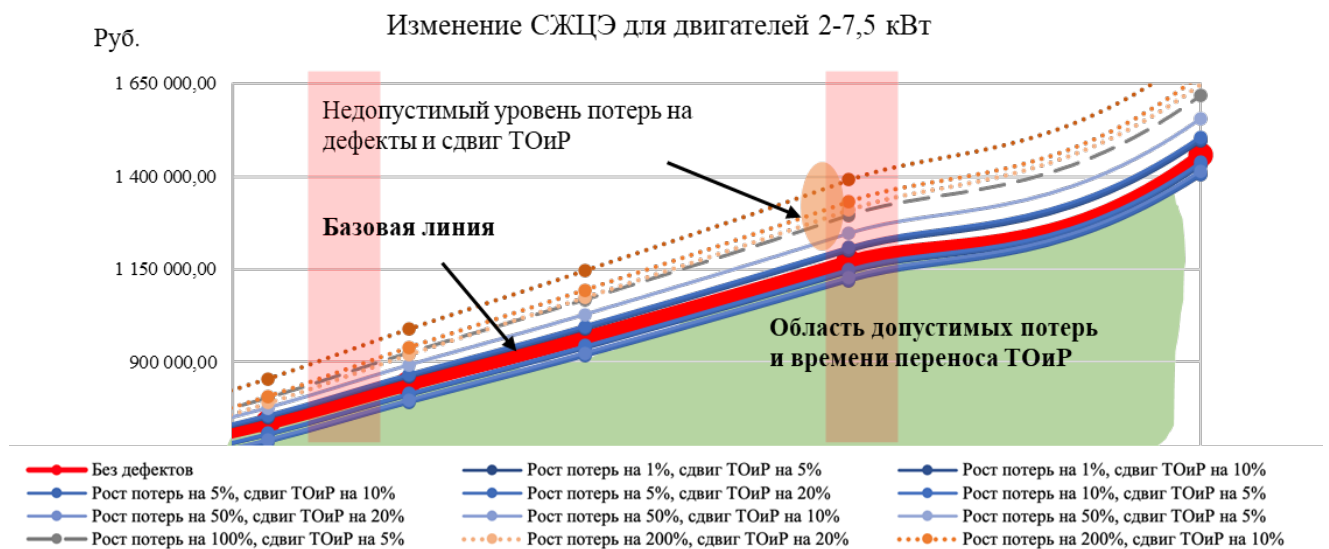


Рисунок 4.11.1 – Изменение СЖЦЭ для двигателей 2-7,5 кВт

Результаты демонстрируют следующее: для двигателей до 0,75 кВт не допускается рост дополнительных потерь свыше 40% при любом регулировании ТООР, в остальных случаях с ростом номинальной мощности двигателя точка пересечения базовой линии снижается по проценту потерь, однако сохраняется эффект экономии стоимости жизненного цикла за счет регулирования ТООР.

Граничным условием для системы принятия решения по эффективному регулированию ТООР в зависимости от потерь и СЖЦЭ будет условие не превышения предельно допустимых значений по перегреву обмоток статора.

4.12 Оценка воздействия эксплуатации ЭМО в ЭТК на окружающую среду

Сегодняшние модели разработки продукта часто основаны на идее, что клиент покупает продукт и несет ответственность за этап использования продукта. Это приводит к тому, что производитель сосредотачивается на получении конкурентоспособной цены для клиента за счет снижения затрат на производство и доставку, что часто отрицательно сказывается на клиенте. Последние этапы, использование и окончание срока службы, часто вносят наибольший вклад в затраты и воздействие на окружающую среду. Одним из способов для предприятий взять на себя ответственность является ориентация на окружающую среду на протяжении всего жизненного цикла своей продукции, т.е. применение бизнес-модели замкнутого цикла. Это прежде всего означает сосредоточиться на основных принципах циркулярной экономики: сокращение, повторное использование и переработка.

Оценка жизненного цикла (Life – cycle assessment, *LCA*) имеет дело с воздействием продуктов на окружающую среду, от добычи сырья до окончания срока службы. Оцениваются все потребляемые материалы и энергия, а также отходы. Воздействие на окружающую среду выражается репрезентативной единицей, например, выбросы парниковых газов выражаются в эквивалентном количестве CO_2 .

Учитывая количество энергии, используемой для электродвигателей, и образующиеся потоки отходов, было бы разумно реализовать некоторые

директивы по регулированию рынка электродвигателей. Отходы электрического и электронного оборудования являются одним из самых быстрорастущих потоков отходов, и в 2005 году было произведено 9 миллионов тонн и ожидается, что в 2020 году они вырастут до более чем 12 миллионов тонн [272]. Если предотвратить потоки отходов или позаботиться о них ответственным образом, можно добиться огромной экономии окружающей среды.

Одним из способов оценки воздействия продукта на окружающую среду в течение всего срока его службы является оценка жизненного цикла. Это метод, используемый для оценки воздействия, например, двигателя в течение всего срока его службы. Жизненный цикл электродвигателей определяется по-разному, но в основном состоит из четырех этапов: производство, транспортировка, использование и утилизация двигателя [187]. Каждая фаза жизненного цикла оказывает воздействие на окружающую среду.

Первый этап – это *этап производства*, который включает в себя добычу материалов, обработку и сборку двигателя. Второй этап – *транспортировка*. В зависимости от используемых транспортных средств и расстояний вклад выбросов парниковых газов значительно варьируется в зависимости от различных сценариев. Третья фаза – это фаза *использования*, на которой учитываются все потери энергии. Эти потери связаны со временем работы, применением, условиями работы и общим сроком службы двигателя. Четвертая фаза – это фаза *окончания срока службы*, когда двигатель утилизируется. Существует несколько возможных сценариев окончания срока службы двигателей, например, двигатель может быть передан компании занимающейся утилизацией отходов, сохранен в качестве запасного или продан на вторичном рынке.

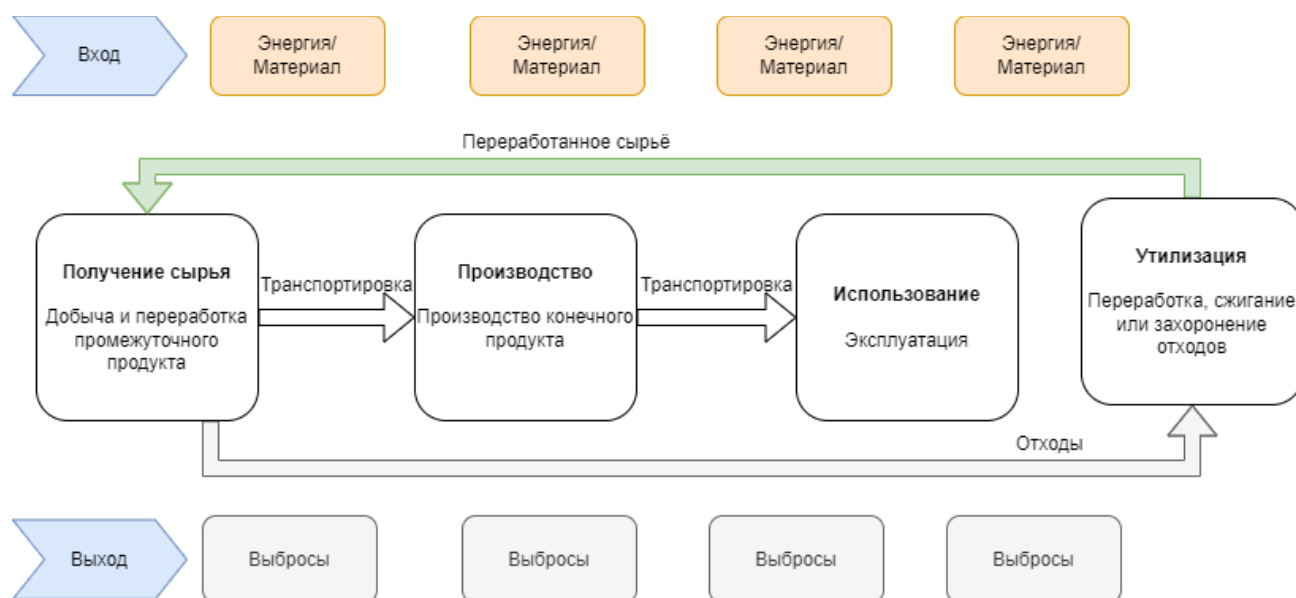


Рисунок 4.12.1 – Системная модель этапов жизненного цикла ЭМО

Согласно оценкам по методикам оценки воздействия жизненного цикла на окружающую среду, в которой учитываются материальные и энергетические потоки, распределение воздействия происходит в следующих пропорциях: производство – 1,98%, распределение – 0,21%, использование – 97,9%, утилизация – 0,1%. В данных оценках учитывается срок службы в часах и годах, КПД и мощность двигателя. Очевидно, что роль воздействия повреждений как с энергетической точки зрения, показанной в главе 2, так и с экологической необходимо учитывать при управлении эксплуатацией.

При определении воздействия потребление энергии при производстве делится на кг от общей массы произведенных машин в отчетном году, чтобы получить среднее значение на кг. После этого среднее значение за кг умножается на вес машины.

В случае с медным ротором примерно 97% всего материала в двигателе возможно переработать. Сжигается 2% всех материалов, в основном те, которые состоят из пластмасс, химикатов и керамики. 1% от общего объема материала, включая металлы, пластмассы, химикаты и керамику, попадает на свалку. В электрическом двигателе с алюминиевым ротором примерно 77,5 от общего количества металлов подлежит переработке, к ним относятся алюминий, сталь и медь. Сжигается 16% всего материала – в основном пластмассы, химикаты,

керамика, 6,5% всего материала попадает на свалку – это металлы пластмассы, химикаты и керамика.

Таблица 4.12.1 – Список процессов и материалов, используемых с двумя машинами мощностью 3 кВт, одна с алюминиевым ротором, одна с медным ротором

Деталь оборудования	Технологический процесс и материалы из базы данных eco-invent	Масса для машины с медным ротором	Масса для машины с алюминиевым ротором
материал ротора	—	7,045 кг	8 075 кг
первичная медь	медь, первичная, на заводе/ RER	2,77кг	—
вторичная медь	медь, вторичная, на заводе/RER	1,13 кг	—
первичный алюминий	алюминий, первичный, на предприятии/RER	—	0,0973 кг
вторичный алюминий	алюминий, вторичный, из нового лома, на предприятии/RER	—	0,8757 кг
электрическая сталь ротора	сталь, конвертерная низколегированная, на предприятии/RER	4,475 кг	7,101 кг
процесс обработки ротора	—	—	—
литье меди и обработка ротора	электроэнергия, среднее напряжение, производство UCTE, в сети/ UCTE S	37 МДж	—
литье алюминия и обработка ротора	электроэнергия, среднее напряжение, производство UCTE, в сети/ UCTE S	—	35,5 МДж
прокатка стали	листовой прокат, сталь/RER	4,475 кг	7,101 кг
материал статора	—	18,625 кг	29,31 кг
первичная медь	медь, первичная, на заводе/RER	0,498 кг	0,719 кг
вторичная медь	медь, вторичная, на заводе/RER	1,992 кг	2,876 кг
электрическая сталь статора	сталь, конвертерная низколегированная, на предприятии/RER	10.19 кг	12,62 кг
подшипники	сталь, низколегированная, на предприятии/RER	3 кг	3,09 кг
корпус первичный алюминиевый	алюминий, первичный, на предприятии/RER	0,2945 кг	0,01 кг
корпус вторичный алюминиевый	алюминий вторичный, из нового лома, на предприятии/RER	2,6505 кг	0,09 кг
железный корпус	чугун на предприятии / GLO	—	9,905 кг
процесс статора	—	—	—
медный процесс	протяжка проволоки, медь/RER	2,49 кг	3,595 кг
прокатка стали	листовой прокат, сталь/RER	10.19 кг	12,62 кг
прокатка подшипников	листовой прокат, сталь/RER	3 кг	3,09 кг
обработка подшипников	электроэнергия, среднее напряжение, производство UCTE, в сети/ UCTE	10.43734 МДж	10.75 МДж
алюминиевое литье (корпус)	электроэнергия, среднее напряжение, производство UCTE, в сети/ UCTE	20,223 МДж	—
чугунное литье (корпус)	электроэнергия, среднее напряжение, производство UCTE, в сети/ UCTE	—	31,13 МДж

Рисунок 4.12.2 – видно, что наибольший вклад в воздействие на климат вносит статор (43 %), за которым следуют ротор (30 %) и корпус (13 %), поскольку статор содержит много железа и меди, а также больше всего весит. При этом по данным *SimaPro* производство чугуна оказывает большее воздействие на климат, чем производство электротехнической стали.

Воздействие на климат компонентов силового преобразователя без фазы использования и утилизации представлено на (Рисунок 4.12.3). Компоненты преобразователя оказывают суммарное воздействие $6,83 \cdot 10^4$ кг эквивалента CO_2 . На рисунке видно, что наибольший вклад вносит полупроводник, $3,43 \cdot 10^4$ кг экв. CO_2 , за ним следуют корпус с экв. $1,46 \cdot 10^4$ кг CO_2 -экв. и охлаждение с $7,03 \cdot 10^3$ кг экв. Процессы, которые имеют большой вклад в эквивалент CO_2 – это транспортировка и производство алюминия. Из компонентов наибольший вклад в воздействие на климат вносят полупроводники (50%), за которыми следуют корпус (21%) и охлаждение (11%).



Рисунок 4.12.2 – Распределение вклада деталей и узлов электрического двигателя в воздействие на климат в кг эквивалента CO_2 , включая все компоненты двигателя

С учетом моделирования влияния компонентного состава повышение энергетической эффективности в цикле эксплуатации на 0,3% способствует снижению воздействия на климат примерно до 10%. Воздействие на потери, обусловленные наличием неисправностей в ЭМО, необходимо рассматривать как действенную меру, которая имеет существенное влияние при принятии долгосрочных решений. При этом снижение потерь электроэнергии оказывает

большее влияние на этапе использования ЭМО, при привязке к особенностям электроэнергетического баланса, на основе которого производится электроэнергия для ЭТК.

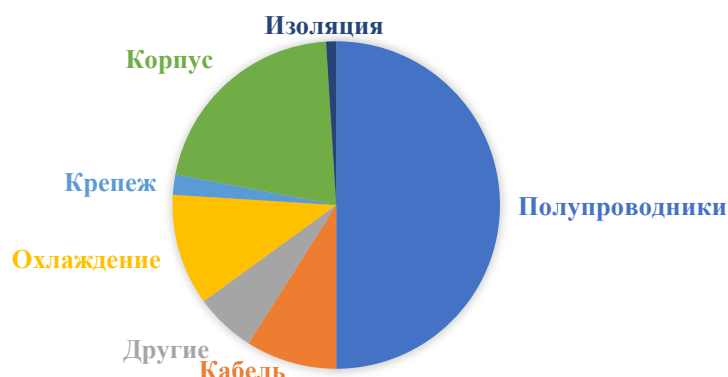


Рисунок 4.12.3 – Вклад узлов и деталей силового преобразователя в воздействие на климат в кг эквивалента CO₂ в процентном соотношении

Таблица 4.12.2 – Удельные показатели выбросов ПГ в зависимости от источника выработки энергии в г/кВтч.

Первичные энергоресурсы	Парниковые газы					
	CO ₂	SO ₂	CO	HC	NO _x	PM
Природный газ	499	0,016	0,418	0,228	2,226	0,019
Ядерное топливо	29	0,0001	0,024	0,013	0,132	0,001
Солнечное тепло	85	0,002	0,073	0,04	0,396	0,003
Уголь	888	0,028	0,733	0,4	3,96	0,03

Переход к ПСТОиР на основе рассмотренных в главе 3 алгоритмов и построения цифровой системы наблюдения и управления (цифрового двойника), которая способна обнаруживать и отслеживать изменения дефектов и связанных с ними дополнительных затрат электроэнергии, с учётом особенностей влияния рассмотренных во второй главе факторов, способна продлить срок службы ЭМО, поскольку его можно обслуживать по фактическому состоянию. Это, в свою очередь, предотвратит излишние ремонтные и восстановительные работы и нерациональное извлечение первичного материала из ЭМО. Помимо этого, ограничение нагрузки по причине наличия дефектов или воздействия внешних факторов снижает потребление энергии и потери, а также продлевает этап жизненного цикла эксплуатации ЭМО.

Прогнозирование времени ремонта, извлечения материалов, замены деталей и переработки способствует снижению эквивалентных выбросов. Управление

эксплуатацией ЭМО на основе эквивалентных выбросов с учётом может принести выгоды для материальных и энергетических потоков, такие как сокращение потребления энергии на этапе использования, сокращение использования сырья в производстве и сокращение использования топлива для транспортировки, то есть оказать влияние по всей цепочке жизненного цикла ЭМО.

Предложенная методика управления системой технического обслуживания в режиме реального времени с использованием цифрового двойника с учетом сценариев позволяет в случае динамично меняющейся производственной среды с учетом экономических факторов и технического состояния ЭМО определять целесообразность принятия решений по переносу мероприятий ТОиР. Предложенные подходы позволяют получить различные цели по времени, стоимости, энергии, выбросам, мощности и различным ограничениям производственной системы, связанные с временем и мощностью. Стратегии технического обслуживания должны постоянно пересматриваться, поскольку в динамично меняющихся производственных условиях статичные стратегии могут повлиять на безопасность и ключевые показатели эффективности ГиНГП.

Эквивалентное количество выбросов CO_2 зависит главным образом от структуры генерирующего оборудования, участвующего в производстве электроэнергии. В общем случае количество выбросов зависит также от потерь, обусловленных структурой и техническим состоянием всего оборудования по производству, преобразованию и передаче электроэнергии.

Представлена диаграмма (Рисунок 4.12.4) из отчёта Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), показывающая средние выбросы CO_2 за весь жизненный цикл электростанций различных типов [313].

Оценке выбросов парниковых газов на различных стадиях жизненного цикла электростанций разных типов посвящено большое количество исследований, в которых применены различные методики. Кроме того, условно одинаковые электростанции на разных континентах могут иметь различный углеродный след, т.к. он зависит не только от технических, но и от природно-климатических, рыночных, социально-экономических и иных условий.

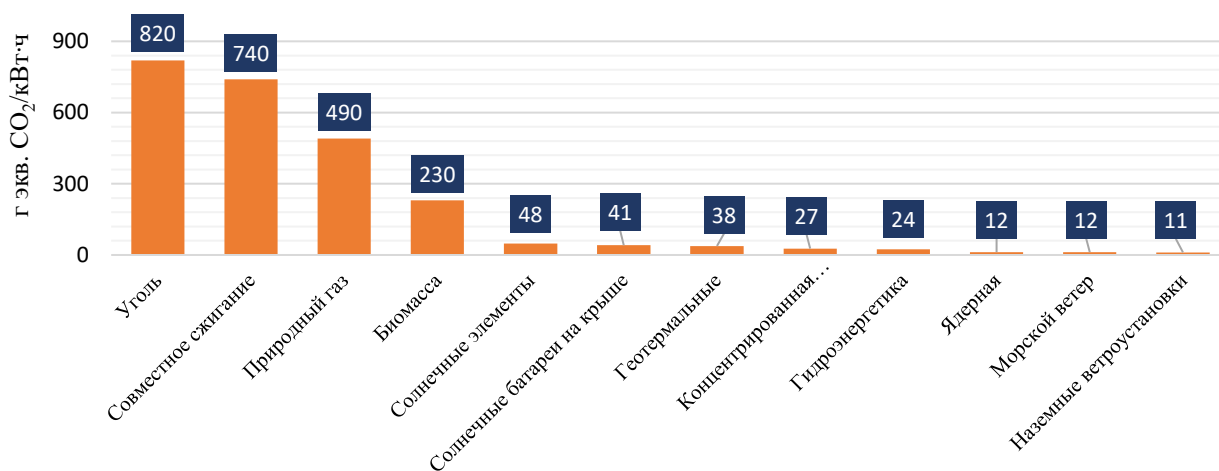


Рисунок 4.12.4 – Средние выбросы CO₂ на протяжении жизненного цикла электростанций на базе различных технологий [313]

В связи с этим результаты, полученные в различных исследованиях, могут значительно отличаться друг от друга, что существенно осложняет анализ информации. Вместе с тем, существуют исследования, в которых предпринимается попытка обобщить результаты множества других исследований [313, 266, 187]. Результаты различных исследований (Таблица 4.12.3) количества выбросов за жизненный цикл некоторых типов электростанций.

Следует отметить, что на различных стадиях жизненного цикла электростанции имеют различный углеродный след. В качестве примера можно рассмотреть диаграммы эквивалентных выбросов на этапах добычи ресурсов и изготовления материалов, сооружения, эксплуатации и утилизации ветряных электростанций и фотоэлектрических станций (Рисунок 4.12.5) [266]. Представленные диаграммы демонстрируют значительную вариацию оценок углеродного следа.

При питании электродвигателя от системы централизованного электроснабжения проблематично определить структуру генерации потребляемой электроэнергии. В связи с этим при расчёте углеродного следа может приниматься приблизительная оценка структуры участвующей в производстве электроэнергии генерации. Например, структура генерации в потреблённой электродвигателем энергии может соотноситься со структурой, потреблённой (или при отсутствии таких данных производимой) электрической энергии в Единой энергетической

системе (ЕЭС) России или в объединённой энергетической системе (ОЭС), в составе которой функционирует электродвигатель.

Таблица 4.12.3 – Оценка удельного углеродного следа электростанций

Тип электростанции	Источник	Кол-во исследований (оценок)	Выбросы эквивалентного количества CO ₂ в отношении к произведенной электроэнергии, г/кВт·ч		
			Диапазон оценок в исследованиях		Среднее значение (медиана)
			min	max	mean (median)
Атомные	[263]	32 (125)	1	220	– (16)
Угольные	[287]	1	920	2570	– (–)
Гидроэнергетика	[187]	–	18	74,9	45,9 (–)
Ветряные	[266]	22 (39)	0,4	364,8	34,1 (12)
	[187]	47	1,7	123,7	34,2 (–)
	[263]	49 (126)	2	81	– (12)
Фотоэлектрические	[266]	23	1	218	49,9 (37,8)
	[263]	26 (124)	5	217	– (46)
Геотермальные	[263]	6 (8)	6	79	– (45)
	[289]	1(4)	18,3	31,9	23 (–)
Приливные	[263]	5 (10)	2	23	– (8)
	[211]	1	–	–	15,0 (–)
Волновые	[269]	1	–	–	22,8 (–)

Показана структура (Таблица 4.12.4) производимой электроэнергии в ЕЭС и ОЭС России в 2021 г. [312].

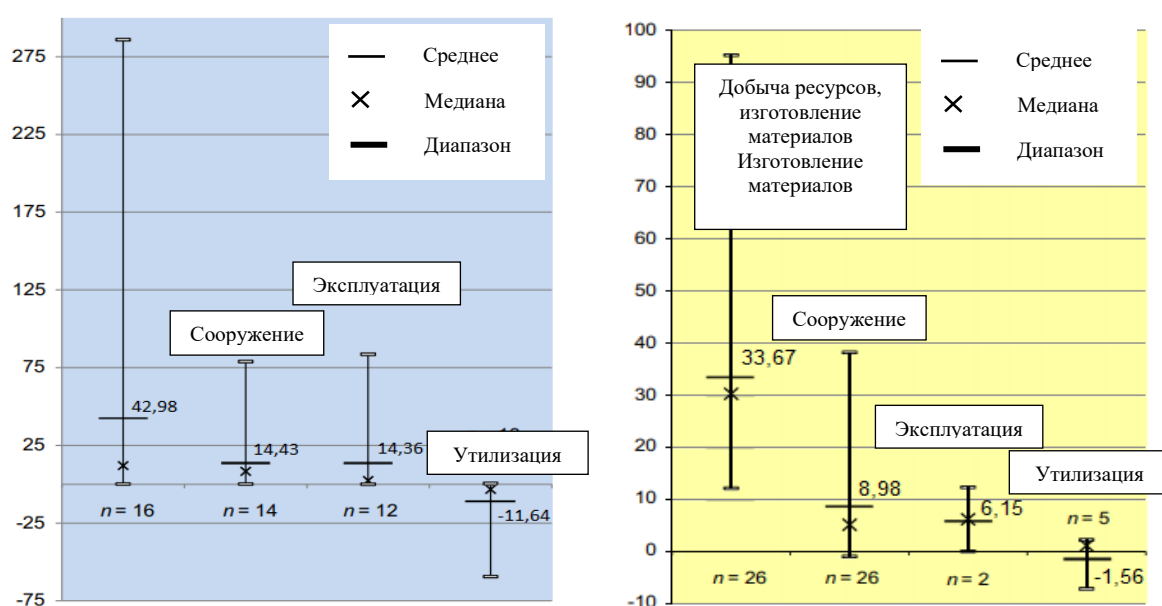


Рисунок 4.12.5 – Эквивалентные выбросы CO₂ на различных этапах жизненного цикла ветряных (слева) и солнечных (справа) электростанций [266]

Таблица 4.12.4 – Оценка удельного углеродного следа электростанций

Энергосистема	Доля генерации для типа электростанции, %				
	ТЭС	ГЭС	АЭС	ВЭС	СЭС
ЕЭС	60,7	18,8	19,9	0,3	0,2
ОЭС Центра	55,7	1,5	42,8	0,0	0,0
ОЭС Средней Волги	51,3	18,5	29,9	0,2	0,2
ОЭС Урала	95,0	1,8	3,0	0,0	0,2
ОЭС Северо-Запада	53,4	11,7	34,9	0,0	0,0
ОЭС Юга	48,8	18,2	28,8	3,1	1,0
ОЭС Сибири	40,6	59,2	0,0	0,0	0,2
ОЭС Востока	59,0	41,0	0,0	0,0	0,0

4.13 Модель комплексного управления устойчивым развитием ЭТК МСК на основе сценарных условий

Реализация функций стратегического управления безопасностью и эффективностью на этапе эксплуатации позволяет повышать результативность проведения работ ТОиР, снижать количество отказов и внеплановых остановов, но в очень незначительном диапазоне относительно существующих возможностей на полном жизненном цикле технических систем производственных активов компании.

Для управления техническими воздействиями необходима комплексная оценка уровня потерь электроэнергии и вредных выбросов, электромеханического оборудования в составе ЭТК ГиНГП в процессе эксплуатации с учетом его технического состояния.

Виды технического воздействия, которые рассматриваются на этапе эксплуатации: профилактическое техническое обслуживание; корректирующее техническое обслуживание; диагностическое обслуживание; текущий ремонт; капитальный ремонт; модернизация, реконструкция, техническое перевооружение.

Профилактическое техническое обслуживание – плановое техническое обслуживание, выполняемое через определенные интервалы времени и направленное на поддержание работоспособного состояния объекта, на раннее выявление неисправностей и снижение вероятности отказов.

Корректирующее техническое обслуживание – техническое обслуживание, выполняемое после обнаружения неисправности с целью возвращения объекта в работоспособное состояние.

Диагностическое техническое обслуживание – это программа профилактического обслуживания, обусловленная обстоятельствами, а не построенная на статистике жизненного цикла по отрасли или по объекту, то есть определенная средней наработкой на отказ. Выполняется в реальном времени, именно там, где и когда оно необходимо.

Текущий ремонт – плановый ремонт, выполняемый для обеспечения или восстановления работоспособности объекта и состоящий в замене и/или восстановлении отдельных легкодоступных его частей.

Капитальный ремонт – плановый ремонт, выполняемый для восстановления исправности и полного или близкого к полному ресурса объекта с заменой или восстановлением любых его частей, включая базовые.

Модернизация – это работы, в результате которых изменилось технологическое или служебное назначение объекта или появилась возможность его работы (использования) с повышенными нагрузками.

Реконструкция – это работы по переустройству объекта, связанному с совершенствованием производства. Целью реконструкции может быть увеличение производственных мощностей, улучшение качества или изменение номенклатуры продукции.

Техническое перевооружение – это комплекс мероприятий по повышению технико-экономических показателей основных средств или их отдельных частей. Техническое перевооружение проводится путем модернизации и замены морально устаревшего и физически изношенного оборудования новым, более производительным.

Для прогнозирования технического воздействия необходимо учитывать изменения в состоянии оборудования на протяжении жизненного цикла и учитывать текущий период времени при определении и анализе потерь и технического состояния, производя корректирующие ограничения по диапазону

переноса ТООР. Каждому периоду времени на протяжении жизненного цикла соответствует свой сценарий. Для оценки различных сценариев развития для примера рассматривались профили изменения электрической нагрузки по активной мощности от времени для ГиНГП. Показано, что для прогнозирования взаимного влияния фактического состояния и энергетических потоков структурных элементов электротехнических комплексов необходимо сценарное прогнозирование, учитывающее условия функционирования ЭТК.

Предлагается методология формирования системы управления регионами и обоснования необходимости внедрения цифровых платформ для повышения эффективности управления жизненным циклом эксплуатации ЭМО.

Методология включает в себя следующие этапы: первоначально проводится обзор региона – текущее состояние энергосистемы и энергетической инфраструктуры, исследование ресурсной базы, топливно-энергетического баланса и сопутствующих проблем, включая климатические особенности региона. Затем исследование делится на последовательное технологическое моделирование спроса и сценарное моделирование. В технологическом разделе определяется состав ключевых потребителей и выделяются текущие и перспективные центры энергетических нагрузок. Примеры потребителей (баз) для Арктического региона (Рисунок 4.13.1).



Рисунок 4.13.1 – Интерактивная карта расположения существующих и проектируемых баз (потребителей) в Арктической зоне Российской Федерации (составлено авторами)

Исходя из анализа трендов и тенденций, к каждому из типов потребителей выносятся требования по категории надежности, требуемой установленной мощности, мобильности, сезонности и углеродному следу [327]. Аналогично проводится оценка возможных к применению ресурсов по их технико-экономическим критериям и выбросам CO₂.

На этапе сценарного моделирования формируются сценарии, согласно условиям которых по результатам опроса среди экспертов будет изменяться спрос на потребление энергии, а также вероятность обеспечения спроса различными видами ресурсов.

Для комплексного управления объектами недропользования и ресурсным развитием посредством цифровых платформ разработана так называемая «Карта процессов» (Рисунок 4.13.2), позволяющая проследить все операции и процессы от «уровня ресурсов» до получения услуг, предоставляемых энергетическими базами – «уровня услуг» [323].

Карта позволяет представить на процессном уровне развитие каких технологий необходимо для достижения устойчивой энергетической инфраструктуры рассматриваемого региона. На схеме последовательно снизу-вверх выделены следующие уровни:

1. Уровень ресурсов (I). На данном уровне фигурируют первичные ресурсы, которые ввозятся в регионы или добываются и представлены в виде запасов в регионе.

2. Уровень ресурсов (II). На втором уровне появляются вторичные ресурсы, полученные в результате осуществления технологического процесса с первичными ресурсами: нефтепродукты, сжиженный природный газ (СПГ), компримированный природный газ (КПГ), попутный нефтяной газ (ПНГ), биотопливо, дрова и твердые коммунальные отходы (ТКО), водород.

3. Энергетический уровень (III). На этом уровне полученные ресурсы с I и II уровней преобразуются в электроэнергию.

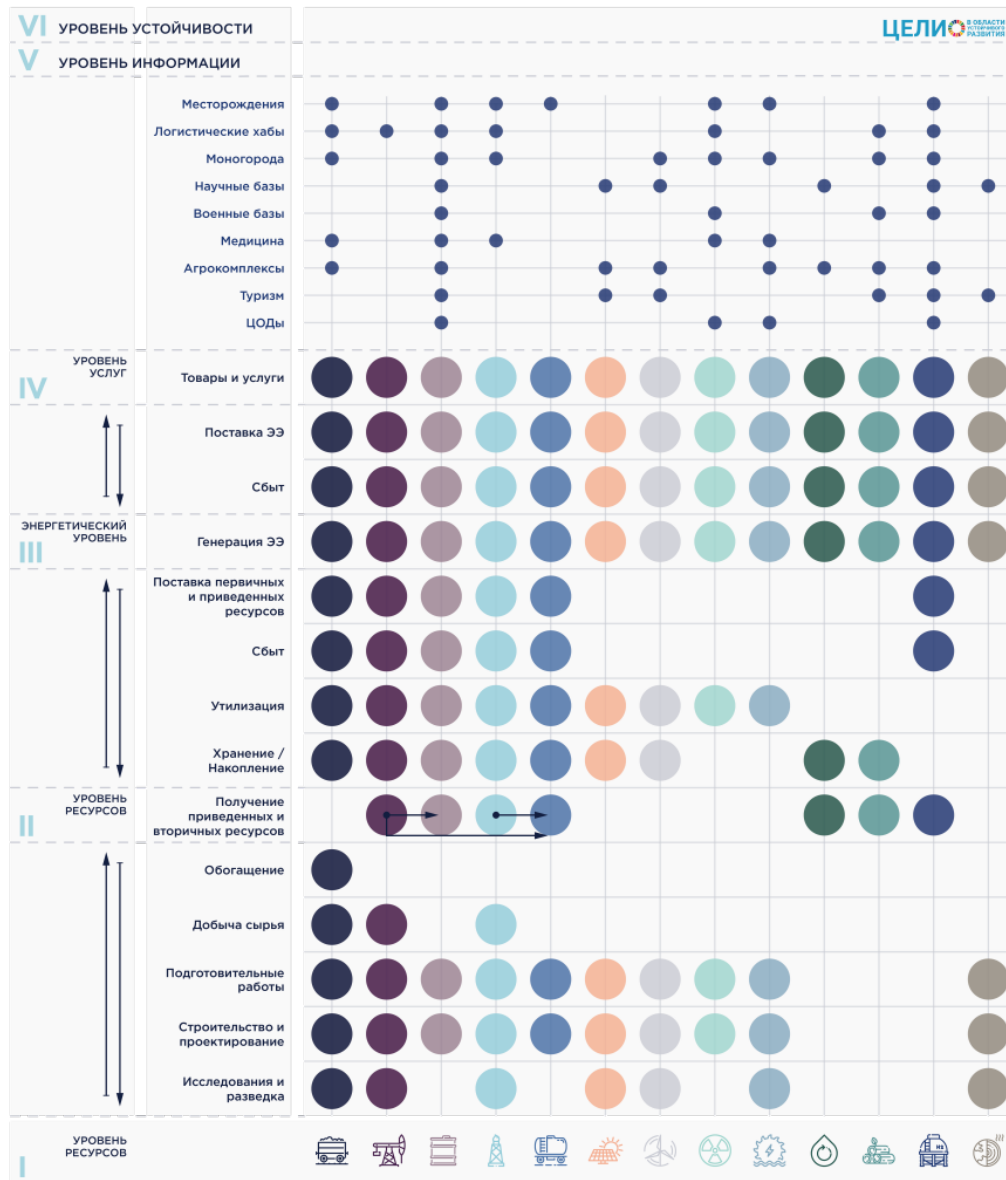


Рисунок 4.13.2 – Карта процессов в рамках цифровой платформы управления устойчивым развитием

4. Уровень товаров и услуг (IV). На данном уровне осуществляется преобразование электроэнергии в товары и услуги посредством их производства в пределах энергетических баз за счет электро- и энергообеспечения.

5. Уровень информации (V). Все уровни и процессы требуют взаимодействия между собой, а также предиктивного управления. Исходя из этого, существуют процессы, которые охватывают предыдущие четыре уровня: управление потоками (логистика), эксплуатация, безопасность и охрана труда. Таким образом, уровень информации является неотъемлемой частью при развитии регионов с точки зрения устойчивости.

6. Уровень устойчивости (VI). Учитывая проблемы и вызовы регионов РФ, данный уровень должен определять приоритетный набор ресурсов и технологий в соответствии с ЦУР.

На (Рисунок 4.13.3) представлена обобщенная методика построения математической модели сценарного прогнозирования развития ЭТК для определения видов и уровней технического воздействия.

Этап 1: Расчет обобщенного коэффициента влияния рисков K_n для каждого из сформированных сценариев на основе проведенного анализа рисков и выделенных трендов потребления из результатов обработки данных по потреблению электроэнергии.

Этап 2: Расчет суммарного влияния риска на развитие вида потребителей. Расчет количества потребляемой энергии W в трех сценариях на различных диапазонах времени на основе проведенной оценки влияния глобальных вызовов на тренды потребления.

Этап 3: Расчет потребляемой энергии и распределение по типам потребителей на основе расчета базового вектора вероятности развития определенного вида потребителей B_{vpn} и результатов расчета суммарных весовых коэффициентов связи рисков и видов потребителей R_G .

Этап 4: Расчет распределения спроса на ресурсы между видами потребителей на основе расчета базового вектора вероятности увеличения спроса на ресурсы H_{vn} и матрицы связи весовых коэффициентов потребителей с ресурсами.



Рисунок 4.13.3 – Методика построения математической модели сценарного прогнозирования развития ЭТК

Для проведения сценарных исследований были рассмотрены основные виды ресурсов: мазут, газ, уголь, СПГ, КПГ, атом, НВИЭ, ПНГ, дизель и водород – *Н1-Н9*.

Для установления численных значений взаимного влияния рисков в различных сценариях на развитие потребления энергии использованы матрицы взаимодействия. Применение метода матриц взаимодействия позволяет выявить степень взаимного влияния факторов рассматриваемого множества и спрогнозировать их поведение в будущем. По результатам анализа риски располагаются на плоскости (Рисунок 4.13.3) в соответствии со следующими осями:

- K_S – ось ординат, сила влияния рисков на развитие потребителей, принимает значения от -1 до 1 (сила уменьшает/увеличивает развитие энергоэффективности);

- K_d – ось абсцисс, влияние рисков на скорость роста потребителей, принимает значения от -1 до 1 (тормозит/ускоряет развитие);

- S – характеризует размер пузырьков, который отражает значимость соответствующего риска для роста потребителей, принимает значения от 0 до 1.

Результаты расчетов обобщенных коэффициентов влияния групп рисков и сценариев (Рисунок 4.13.4).

На основе данных матрицы взаимодействия каждая группа рисков (политические, экономические, социальные, технологические, экологические, правовые риски) представлена в виде обобщенного коэффициента влияния (4.13.1).

$$K_n = \frac{(K_S + K_d)S}{2}. \quad (4.13.1)$$

По результатам анализа и расчетов для каждого из сценариев полученный окончательный обобщенный коэффициент влияния (суммарный) определяет конечную степень значимости трех показателей каждой группы рисков для развития арктических потребителей и, как следствие, роста потребления энергии и спроса на строительство источников энергии и энергетической инфраструктуры.



Рисунок 4.13.4 – Результаты численного анализа рисков при различных сценариях

Далее требуется провести оценку влияния глобальных вызовов на развитие различных видов потребителей, в данном конкретном случае рассматривается Арктика, чтобы в дальнейшем прогнозировать спрос на энергию с учетом взаимного влияния вызовов. Всего было выделено девять видов потребителей $P1-P9$ (Таблица 4.13.1). Количество и свойства потребителей могут меняться в зависимости от рассматриваемого региона или уровня моделирования.

Таблица 4.13.1 – Символьное обозначение арктических потребителей

Тип потребителя	Р
Военные базы	$P1$
Углеводородные месторождения	$P2$
Населенные пункты (моногорода)	$P3$
Научно-исследовательские базы	$P4$
Логистические кластеры	$P5$
Медицинские базы	$P6$
Агрокомплексы	$P7$
Туристические базы	$P8$
Центры обработки данных (ЦОДы)	$P9$

На основе проведенного опроса возможно определение влияния групп рисков на развитие потребителей для различных диапазонов времени. При этом проводится обработка вопросов о влиянии рисков на различных временных интервалах. Коэффициенты принимают значения от 0 до 1 с шагом 0,01. С учетом диапазонов выделяются три разные ситуации: до 0,3 для слабого влияния; 0,30 –

0,6 соответствует условиям среднего эффекта; выше 0,61 в контексте сильного влияния.

Следует отметить, что эти значения усреднены для всех экспертов, исключая наблюдения с неполной информацией об основных видах потребителей. Таким образом, могут быть получены весовые коэффициенты, позволяющие оценить степень влияния рисков на развитие потребителей энергии (Таблица 4.13.2).

Таблица 4.13.2 – Влияние рисков при развитии потребителей в 2020-2025 гг.

Тип потребителя	<i>P</i>	<i>G1</i>	<i>G2</i>	<i>G3</i>	<i>G4</i>	<i>G5</i>	<i>G6</i>	Суммарное влияние риска R_{Yi}
Военные базы	<i>P1</i>	0,3	-0,2	0,07	0,1	0,01	-0,02	0,0433
Углеводородные месторождения	<i>P2</i>	-0,28	0,17	0,11	0,14	-0,4	0,11	-0,043
Населенные пункты (моногорода)	<i>P3</i>	0,01	-0,32	-0,21	0,12	-0,4	0,04	-0,127
Научно-исследовательские базы	<i>P4</i>	0,05	0,18	0,04	0,03	0,2	0,09	0,098
Логистические кластеры	<i>P5</i>	-0,3	0,12	-0,1	0,2	-0,08	0,3	0,023
Медицинские базы	<i>P6</i>	0,07	0,16	-0,3	0,01	-0,1	0,06	-0,016
Агрокомплексы	<i>P7</i>	0,06	0,15	0,11	0,07	-0,22	0,05	0,036
Туристические базы	<i>P8</i>	-0,4	0,1	0,08	0,04	-0,06	0,04	-0,033
Центры обработки данных (ЦОДы)	<i>P9</i>	0,31	0,15	0,25	0,2	-0,35	0,12	0,113
Сумма								0,094

Суммарные весовые коэффициенты связи рисков и видов арктических потребителей (Таблица 4.13.3).

Основываясь на итоговых весовых коэффициентах связи рисков и видов потребителей, определяется прогноз спроса на энергию для потребителей на различных диапазонах времени жизненного цикла эксплуатации ЭТК.

Таблица 4.13.3 – Суммарные весовые коэффициенты связи рисков и видов арктических потребителей

	<i>G1-G6 (2020-2025)</i>	<i>G1-G6 (2025-2030)</i>	<i>G1-G6 (2030-2035)</i>	<i>G1-G6 (2035+)</i>
R_{Gj}	0,094	0,101	0,37	0,55

При этом используется величина базового вектора вероятности развития определенного вида потребителей, полученного из опроса экспертов. Данный вектор приведен к внутренней нормализации (4.13.2).

$$B_{vpn} = \frac{B_{vpi}}{\sum_{i=1}^n B_{pi}} \cdot 100, \quad (4.13.2)$$

где B_{vpi} – базовый вектор вероятности развития вида потребителей;

B_{vpi} – внутренняя нормализация базового вектора вероятности развития вида потребителей.

Итоговый прогноз прироста спроса на энергию определенными видами потребителей по годам с учетом сценариев (4.13.3).

$$W_{iyn} = \frac{W_f(t) \cdot (1 \pm K_n \cdot R_{Gj}) \cdot B_{vpi}}{100}, \quad (4.13.3)$$

где $W_f(t)$ – выделенный тренд потребления электроэнергии на периоде, предшествующем прогнозному.

В качестве базиса взяты доступные данные потребления периода с 2010 по 2020 годы на территории Арктики.

В таблице 4.13.4 приведены результаты расчетов спроса на энергию до 2025 г. Для других интервалов времени производятся аналогичные расчеты.

Таблица 4.13.4 – Прогноз потребляемой энергии по типам потребителей к 2025 г.

Тип потребителя	P	Базовый вектор вероятности на основе опроса	Нейтральный сценарий (2020-2025), млрд кВтч	Негативный сценарий (2020-2025), млрд кВтч	Позитивный сценарий (2020-2025), млрд кВтч
Военные базы	$P1$	0,760606	5,041147651	4,849507195	5,288262977
Углеводородные месторождения	$P2$	0,912121	6,045359407	5,815543595	6,341700847
Населенные пункты (моногорода)	$P3$	0,693939	4,599291828	4,424448628	4,824747533
Научно-исследовательские базы	$P4$	0,657576	4,358284983	4,192603717	4,571926615
Логистические кластеры	$P5$	0,690909	4,579209581	4,405129813	4,803680861
Медицинские базы	$P6$	0,475758	3,153230877	3,033360036	3,307801171
Агрокомплексы	$P7$	0,409091	2,711375053	2,60830147	2,844285727
Туристические базы	$P8$	0,342424	2,26951923	2,183242903	2,380770283
Центры обработки данных (ЦОДы)	$P9$	0,457576	3,032724141	2,917434393	3,181387236
Общее			35,79014275	37,120479	36,59403675

На основе выражения, учитывающего изменение потребления энергии на временном интервале и нормированного суммарного влияния рисков, получается распределение прироста (убывания) потребления энергии по видам потребителей.

Таким образом, на данном этапе обосновано прогнозное развитие видов потребителей и связанное с этим сценарное изменение в потреблении энергии.

Для проведения сценарных исследований рассмотрены основные виды ресурсов и установлены условные обозначения *H1-H9*: мазут (*H1*); газ (*H2*); уголь (*H3*); СПГ и КСПГ (*H4*); атом (*H5*); НВИЭ (*H6*); ПНГ (*H7*); дизель (*H8*) и водород (*H9*).

Энергетические требования потребителей определяли силу связи с видами ресурсов на основе их критериев. По результатам обработки экспертной оценки связи была составлена таблица весовых коэффициентов. Исходя из результатов анализа и сопоставления требований потребителей и характеристик видов ресурсов составлена матрица связи (Таблица 4.13.5). Наиболее высокое значение говорит о более подходящем выборе и соответствии ресурса для обеспечения данного вида потребителей с учетом наиболее полного удовлетворения требований. Коэффициенты принимают значения от 0 до 1 с шагом 0,001 и учетом диапазонов: 0,001-0,3 слабая связь; 0,301-0,6 связь средней степени; 0,601-1 сильная связь.

Изменения спроса на определенные виды потребителей в рассматриваемом регионе будут определять изменения спроса на энергетические ресурсы. Для этого на основе таблицы весовых коэффициентов связи потребителей с ресурсами был определен прогноз спроса на энергию из определенного вида ресурса.

Таблица 4.13.5 – Матрица связи весовых коэффициентов потребителей с ресурсами

<i>H/P</i>	<i>P1</i>	<i>P2</i>	<i>P3</i>	<i>P4</i>	<i>P5</i>	<i>P6</i>	<i>P7</i>	<i>P8</i>	<i>P9</i>
<i>H1</i>	0,86	0,5	0,55	0,57	0,1	0,3	0,1	0,1	0,1
<i>H2</i>	0,8	0,94	0,87	0,65	0,87	0,67	0,67	0,77	0,64
<i>H3</i>	0,86	0,76	0,56	0,45	0,58	0,34	0,22	0,1	0,1
<i>H4</i>	0,89	0,3	0,67	0,34	0,56	0,34	0,78	0,82	0,34
<i>H5</i>	0,67	0,92	0,45	0,34	0,87	0,32	0,45	0,34	0,89
<i>H6</i>	0,76	0,56	0,78	0,88	0,45	0,67	0,78	0,89	0,68
<i>H7</i>	0,3	0,8	0,5	0,4	0,76	0,45	0,65	0,43	0,78
<i>H8</i>	0,89	0,32	0,45	0,54	0,23	0,34	0,21	0,2	0,12
<i>H9</i>	0,78	0,56	0,67	0,45	0,67	0,56	0,78	0,67	0,9

Прогнозирование увеличения спроса на энергетические ресурсы (4.13.4) осуществлялось с учетом базового вектора вероятности увеличения спроса на

ресурсы (H_{vi}) и его внутренней нормализации (H_{vn}). Данный вектор был получен на основании данных опроса. При моделировании учитываются матрицы связи потребителей электроэнергии и ресурсов в виде нормализованного вектора (L_{vn}), который корректирует прогноз на спрос определенных видов ресурсов и отражает конкурентное распределение в результате сценарных условий, но не изменяет величину общего спроса (4.13.4).

$$H_i = \Delta W_{iynf}(t) \cdot \frac{H_{vin} \cdot L_{vin} \cdot 100}{\sum_{i=1}^n H_{vin} \cdot L_{vin}}, \quad (4.13.4)$$

где $\Delta W_{iynf}(t)$ – изменения потребления энергии с учетом сценарных условий на выделенном диапазоне времени.

В таблице 4.13.6 приведены результаты расчетов сценарного прогнозирования увеличения или снижения спроса на ресурсы на интервале времени 2020-2025 гг. Аналогичные расчеты произведены и на других интервалах времени.

Таблица 4.13.6 – Результаты расчетов сценарного прогнозирования спроса на ресурсы к 2025 году

Тип ресурса	H	H_v Базовый вектор вероятности на основе опроса	H_{vn} Внутренняя нормализация базового вектора вероятности	L_{vn} Нормализация с учетом связи с типами потребителей	Нейтральный сценарий (2020-2025), млрд кВтч	Негативный сценарий (2020-2025), млрд кВтч	Позитивный сценарий (2020-2025), млрд кВтч
Мазут	$H1$	0,760606	14,0853	7,038513	3,155958122	3,037160292	3,309144796
Газ	$H2$	0,912121	16,89113	15,22798	8,18813799	7,879916847	8,585581042
Уголь	$H3$	0,693939	12,85072	8,787074	3,594644762	3,459333716	3,769124795
СПГ и КПГ	$H4$	0,657576	12,17733	11,15538	4,324347858	4,161569039	4,534246863
Атом	$H5$	0,690909	12,79461	11,62019	4,732867717	4,55471123	4,962595818
НВИЭ	$H6$	0,475758	8,810333	14,27623	4,003962935	3,853244171	4,198310814
ПНГ	$H7$	0,409091	7,575759	11,22178	2,706276212	2,604405488	2,83763583
Дизель	$H8$	0,342424	6,341185	7,304117	1,47442394	1,418923088	1,545990828
Водород	$H9$	0,457576	8,47363	13,36875	3,606155464	3,470411128	3,781194214
Общее			100%	100%	35,786775	34,439675	37,523825

На (Рисунок 4.13.5) представлены результаты прогноза потребляемой энергии арктическими потребителями на основе сценарных условий и рисков, где рассмотрены 3 сценария развития потребления электрической энергии и процесс изменения топливно-энергетического баланса в Арктике на период с 2021 по 2035 годы.

Модель позволила учесть не только рост, но и падение доли определенных видов потребителей при разных сценариях. Заметен рост потребления энергии центров обработки данных, что обусловлено появлением новых стратегических и экономических объектов, появляющихся к 2025-2030 годам (обеспечение Северный морской путь – СМП, Северный широтный ход – СШХ, военных баз, научно-исследовательских баз).

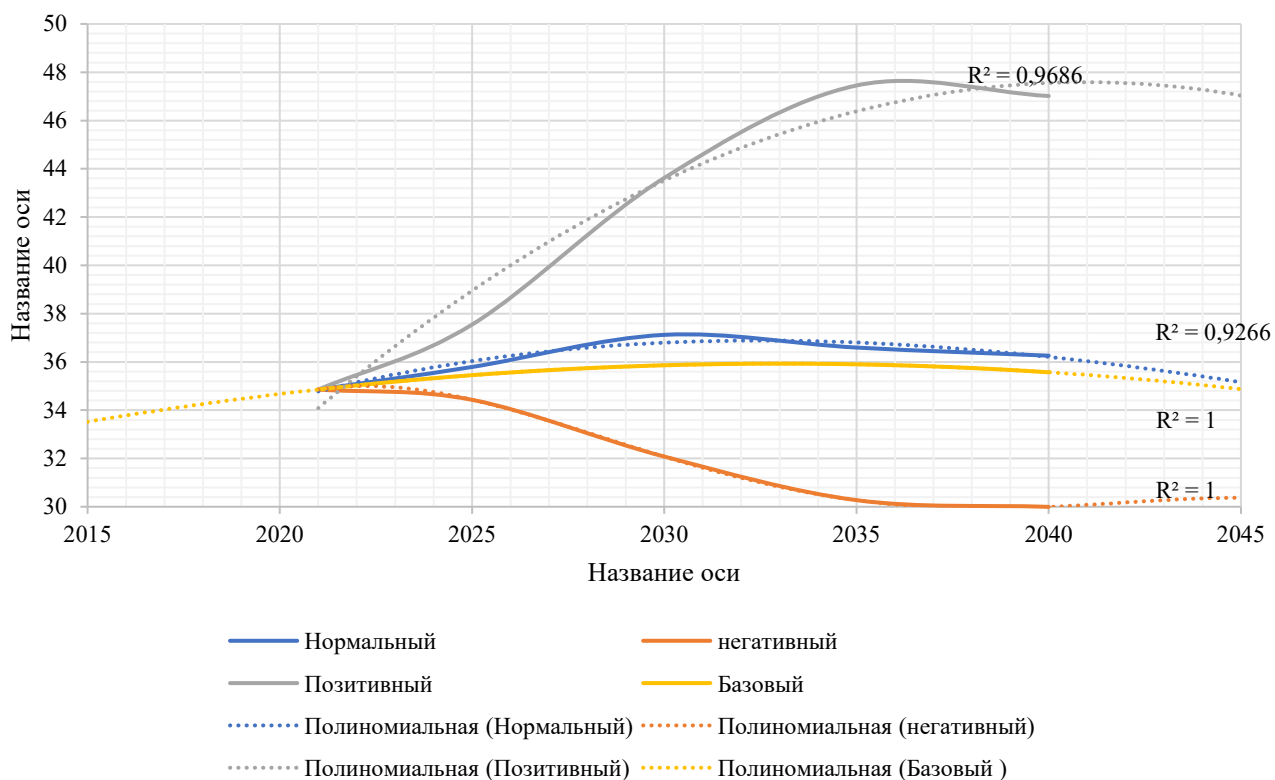


Рисунок 4.13.5 – Сценарный прогноз потребления энергии на примере Арктики, млрд кВт·ч.

Определение доли спроса ЭМО в структуре прироста определяется на основе первоначально установленного уровня в результате сбора данных, а в последствии может корректироваться с учетом технологического влияния. Для проведения следующего этапа исследования необходимо оценить воздействие глобальных вызовов на характеристики инфраструктуры с целью дальнейшего

прогнозирования состояния энергетической её части с учетом взаимного влияния глобальных вызовов и развития технологий.

Аналогично повысится спрос на углеводородные месторождения, так как в Арктике большой потенциал природных ресурсов, которые уже эксплуатируются, и с развитием и появлением технологий, специализированных под арктические условия, будут иметь высокий спрос на потребление энергии. Инвестирование в СМП, СШХ и развитие портов, железных и автодорог станет также толчком для увеличения потребления энергии логистических кластеров в Арктике.

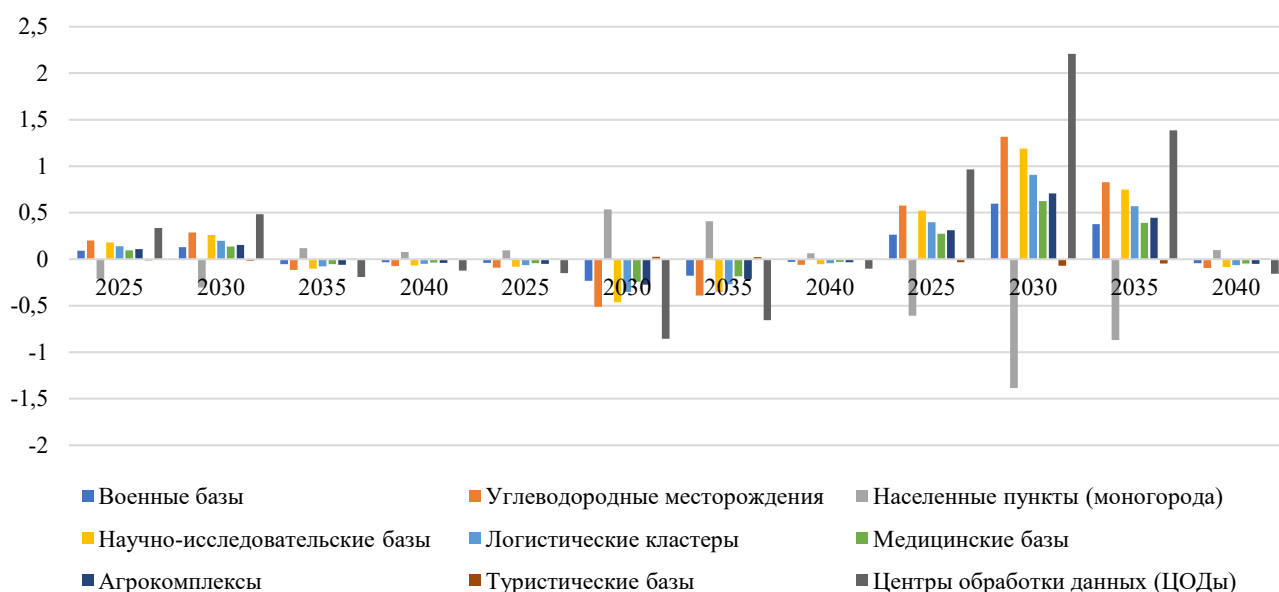


Рисунок 4.13.6 – Распределение прогнозного прироста потребления энергии по видам потребителей, млрд кВт·ч

4.14 Моделирование влияния вызовов и цифровых технологий на износ энергетической инфраструктуры

Для проведения следующего этапа исследования необходимо оценить воздействие глобальных вызовов на характеристики инфраструктуры с целью дальнейшего прогнозирования состояния энергетической её части с учетом взаимного влияния глобальных вызовов и развития технологий [1].

Признаки состояния инфраструктуры – это индикативные показатели, по которым можно делать общий вывод о структурных проблемах и уязвимостях всей энергетической инфраструктуры:

P1 – надежность (обобщает в себе безотказность, восстанавливаемость, живучесть, безопасность, управляемость, сохраняемость, устойчивость);

P2 – стоимость эксплуатации (за весь период эксплуатации);

P3 – доступность (состояние инфраструктуры, при котором субъекты, имеющие права доступа, могут реализовывать их работу беспрепятственно);

P4 – наблюдаемость (возможности системы предоставлять информацию о текущем состоянии, необходимую для управления ею);

P5 – аварийность (общее количество аварийных ситуаций за весь период эксплуатации);

P6 – время обслуживания (ввод оборудования, эксплуатация, техническое обслуживание и ремонт, вывод оборудования, утилизация);

P7 – пропускная способность (максимально допустимая мощность, которая может быть передана с учетом условий эксплуатации и параметров надежности функционирования инфраструктуры);

P8 – экологическая безопасность (свойства энергетической инфраструктуры при эксплуатации и в случае нарушения работоспособного состояния не создавать угрозу для жизни и здоровья людей, а также для окружающей среды).

В связи с этим необходимо учитывать вклад в определенные свойства энергетической инфраструктуры ключевых технологий. По результатам изучения международных и локальных источников информации была выявлена 31 основная технология, влияние которых отражается в признаках состояния инфраструктуры энергетического сектора. Все проанализированные технологии в рамках направления были разделены на 6 групп по функциональным свойствам *T1-T6*. В ходе исследования для восьми характеристик *P1-P8* по результатам исследования и экспертного опроса были установлены весовые коэффициенты связи с технологическими блоками. Они позволяют выявить степень влияния технологических изменений на состояние инфраструктуры в целом и отдельно по признакам. Данные основаны на опросе сотрудников компаний топливно-энергетического комплекса и работников сферы высшего образования профильных вузов, который проводился в период с зимы 2019 г. по осень 2020 г. Команда опроса

набрала более 200 респондентов от нескольких государств, в том числе от России, Франции и Испании и др. Постепенно более целенаправленный скрининг потенциальных участников гарантировал, что окончательная выборка будет репрезентативной для более узкого анализа состояния энергетической инфраструктуры. Предложенная сценарная модель объясняет более 72% дисперсии от полученных по результатам опроса начальных собственных значений.

В ходе моделирования весовых коэффициентов была определена степень влияния технологических блоков на состояние инфраструктуры. Как следствие через технологии модель позволяет отследить изменения признаков, на которые будут оказывать влияние рассматриваемые вызовы. Обратная последовательность позволяет выявить необходимые технологические преобразования, способные оказать влияние на признаки состояния инфраструктуры и определить наиболее проблемные секторы, которым необходимо уделить пристальное влияние.

Таблица 4.14.1 – Весовые коэффициенты связи характеристик инфраструктуры с глобальными вызовами

	<i>P1</i>	<i>P2</i>	<i>P3</i>	<i>P4</i>	<i>P5</i>	<i>P6</i>	<i>P7</i>	<i>P8</i>
G1	0.786	0.674	0.732	0.532	0.620	0.534	0.611	0.134
G2	0.765	0.575	0.467	0.437	0.482	0.362	0.932	0.132
G3	0.880	0.945	0.834	0.760	0.832	0.782	0.901	0.822
G4	0.879	0.838	0.956	0.656	0.741	0.821	0.930	0.181
G5	0.456	0.759	0.478	0.357	0.389	0.745	0.145	0.942
G6	0.698	0.889	0.930	0.781	0.791	0.621	0.543	0.281

Таким образом, в данном разделе была выполнена задача измерения влияния технологий из блоков *T1-T6* на скорость обновления инфраструктуры в электроэнергетике по основным характеристикам *P1-P8*. Было выявлено, что наибольшее влияния на состояния энергетической инфраструктуры оказывают такие технологические блоки как Информационные технологии, Цифровые технологии (наивысшее соотношение надежности, наблюдаемости, сокращения аварийности и времени обслуживания).

Коэффициенты принимают значения от 0 до 1 с шагом 0,001 с учетом диапазонов: 0,001-0,3 слабое влияние; 0,301-0,6 влияние средней степени; 0,601-1 сильное влияние. Проведено усреднение полученных данных по всем экспертам,

исключая наблюдения с неполной информацией о ключевых характеристиках состояния инфраструктуры.

Следующим этапом исследования является определение взаимного влияния вызовов с учетом сценарных условий и технологий на характеристики энергетической инфраструктуры до 2030 года. В первую очередь для этого было необходимо определить коэффициент изменения исследуемых глобальных вызовов X_{G1-G6} в соответствии с прогнозами ведущих агентств и компаний топливно-энергетического сектора, который будет связан с показателями характеристик энергетической инфраструктуры через весовые коэффициенты, полученные в ходе исследования. Количественные характеристики вызовов (Таблица 4.14.3).

Таблица 4.14.2 – Весовые коэффициенты связи характеристик инфраструктуры с технологическими блоками

	<i>P1</i>	<i>P2</i>	<i>P3</i>	<i>P4</i>	<i>P5</i>	<i>P6</i>	<i>P7</i>	<i>P8</i>
<i>T1</i>	0.571	0.691	0.829	0.311	- 0.286	0.112	0.362	0.759
<i>T2</i>	0.763	0.443	0.685	0.796	- 0.467	-0.422	0.221	0.247
<i>T3</i>	0.790	0.522	0.356	0.782	- 0.786	-0.121	0.142	0.178
<i>T4</i>	0.597	0.141	0.241	0.111	- 0.690	-0.124	0.365	0.030
<i>T5</i>	0.124	0.423	0.624	0.211	-0.578	0.090	0.657	0.698
<i>T6</i>	0.791	0.652	0.561	0.141	0.121	0.154	0.221	-0.274

С учетом данных (Таблица 4.14.3) был произведен расчет количественных характеристик энергетической инфраструктуры с учетом влияния глобальных вызовов при сценарном моделировании и весовых коэффициентов (Таблица 4.14.2).

Таблица 4.14.3 – Изменение исследуемых глобальных вызовов 2020-2035.

№	Индекс	2020	2035	X, %
<i>G1</i>	Население, млрд	7.79 (UN, 2020)	8.89 (UN, 2020)	14
<i>G2</i>	Городское население, %	56.2 (UN, 2020)	62.5 (UN, 2020)	11,2
<i>G3</i>	Затраты на исследования и разработки, %	22.5(WB, 2018)	26.5 (WB, 2018)	18
<i>G4</i>	Потребление энергии, квадриллион БТЕ	4.82 (EIA, 2020)	5.14 (EIA, 2020)	6,6
<i>G5</i>	Выбросы CO ₂ , ГТ CO ₂	35.34 (BP 2020; EIA 2020)	37.46 (BP 2020; EIA 2020)	5
<i>G6</i>	ВВП, тыс млрд долларов США	103.04 (OECD, 2020)	156.2 (OECD, 2020)	51

Весовые коэффициенты W_{ij} связи между 8 характеристиками инфраструктуры $P(j = 1 \dots 8)$ и 6 глобальными вызовами $G(j = 1 \dots 6)$ умножаются на коэффициент изменения глобальных вызовов X_i по формуле (4.14.1).

$$V_{ij} = W_{ij} \cdot X_i, \quad (4.14.1)$$

где V_{ij} – новые весовые коэффициенты связи между 8 характеристиками инфраструктуры и 6 глобальными вызовами с учетом коэффициента изменения глобальных вызовов X_i ;

W_{ij} – весовые коэффициенты связи между 8 характеристиками инфраструктуры и 6 глобальными проблемами;

X_i – коэффициент изменения глобальных вызовов;

i – количество задач, j – количество характеристик.

Новое значение характеристики инфраструктуры \bar{P}_j с учетом всех 6 вызовов рассчитывается по формуле (4.14.2).

$$\bar{P}_j = C_j \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 V_{ij}, \quad (4.14.2)$$

где $C_j(j = 1 \dots 8)$ – текущий уровень значения характеристики инфраструктуры $P_j(j = 1 \dots 8)$;

V_{ij} – весовой коэффициент из формулы;

i – количество глобальных проблем.

С учетом коэффициента K_N в негативном сценарии и коэффициента K_P в позитивном сценарии определяем разброс характеристик инфраструктуры для негативного и позитивного сценариев по формулам (4.14.3) – (4.14.4).

$$\Delta \bar{P}_j \text{ н} = (C_j - \bar{P}_j) \cdot K_N, \quad (4.14.3)$$

$$\Delta \bar{P}_j \text{ п} = (C_j - \bar{P}_j) \cdot K_P, \quad (4.14.4)$$

где $\Delta \bar{P}_j \text{ н}$ – изменение характеристик инфраструктуры для негативного сценария;

$\Delta \bar{P}_j \text{ п}$ – изменение характеристик инфраструктуры для позитивного сценария.

Получаем окончательное значение P_j отрицательных характеристик энергетической инфраструктуры в негативном сценарии и P_j положительных

характеристик энергетической инфраструктуры в положительном сценарии по формулам (4.14.5) – (4.14.6).

$$\bar{P}_j \text{ н} = C_j - \Delta \bar{P}_j \text{ н}, \quad (4.14.5)$$

$$\bar{P}_j \text{ п} = C_j + \Delta \bar{P}_j \text{ п}, \quad (4.14.6)$$

Интенсивность необходимых технологических изменений R_m технологических блоков $T(j = 1 \dots 6)$ рассчитывалась по формулам (4.14.7) – (4.14.8).

$$R_m = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^{j=8} R_{mj}, \quad (4.14.7)$$

$$R_{mj} = \frac{L_j}{\bar{P}_j \text{ п} \cdot \frac{1}{8} \sum_{j=8}^{j=1} Z_{mj}}, \quad (4.14.8)$$

R_{mj} – текущий уровень значения характеристики инфраструктуры;

L_j представляет собой средний весовой коэффициент влияния технологического блока на характеристики инфраструктуры;

\bar{P}_j – положительный представляет собой значение характеристик инфраструктуры Z_{mj} , полученное с учетом влияния вызовов и технологических изменений.

В негативном сценарии результат сильного инвестиционного разрыва, увеличивающейся нагрузки в результате увеличения потребления, ухудшения экологической ситуации и низкого уровня проникновения технологий в инфраструктуре выводит в критическую зону состояние надежности и аварийности энергетическую инфраструктуру. Необходимого уровня состояния инфраструктуры для выполнения требований экологической безопасности добиться также не удастся.

По направлениям доступности и времени обслуживания изменения будут самыми существенными, ведь чтобы инфраструктура не стала сдерживающим фактором инновационного развития и перехода к цифровой экономике необходимы технологические изменения, способные повлиять на наблюдаемость, стоимость владения и экологическую безопасность.

В позитивном сценарии одним из основных факторов достижения показателей качества инфраструктуры является высокий уровень проникновения

технологий, при этом основное влияние окажут такие технологические блоки, как Возобновляемая энергетика, Информационные технологии и Цифровые технологии (Рисунок 4.14.2).

Таким образом, предложенная модель позволяет оценить необходимые технологические изменения, которые могут повлиять на свойства инфраструктуры, а также, учитывая коэффициенты влияния свойств инфраструктуры на риски эксплуатации ЭМО в составе ЭТК ГиНГП, позволяет обобщенно оценить прогнозируемые риски на этапе эксплуатации ЭМО с учетом развития технологических блоков и глобальных вызовов.

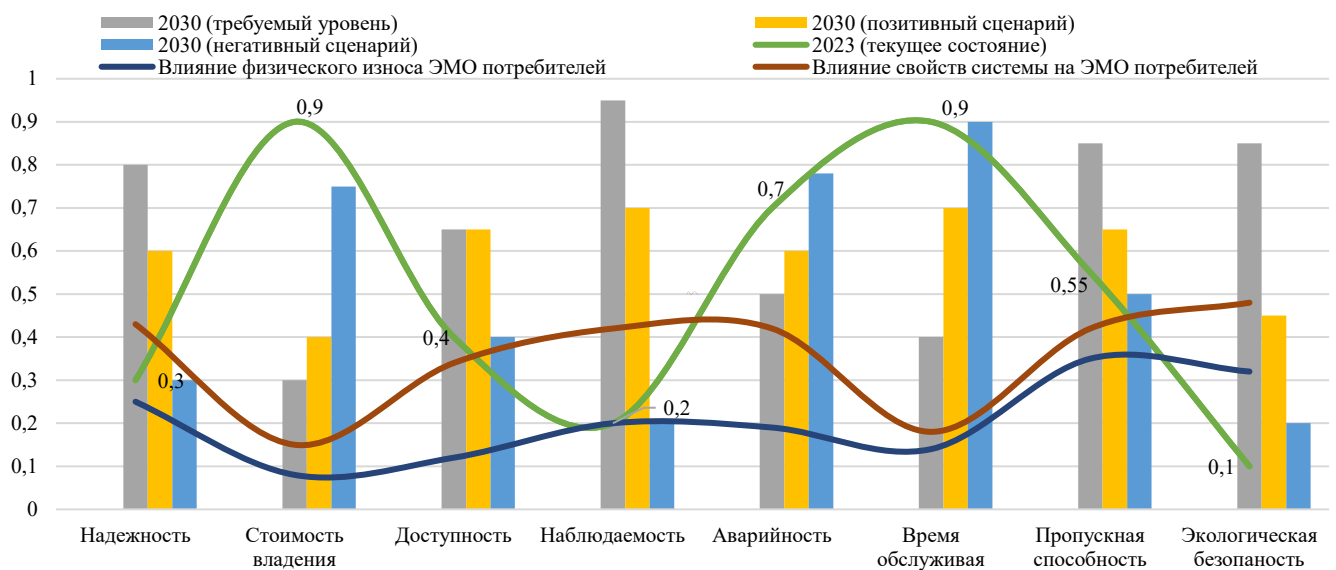


Рисунок 4.14.1 – Результаты сценарного моделирования изменения свойств энергетической инфраструктуры с учетом технологических изменений и их влияние на риски эксплуатации ЭМО

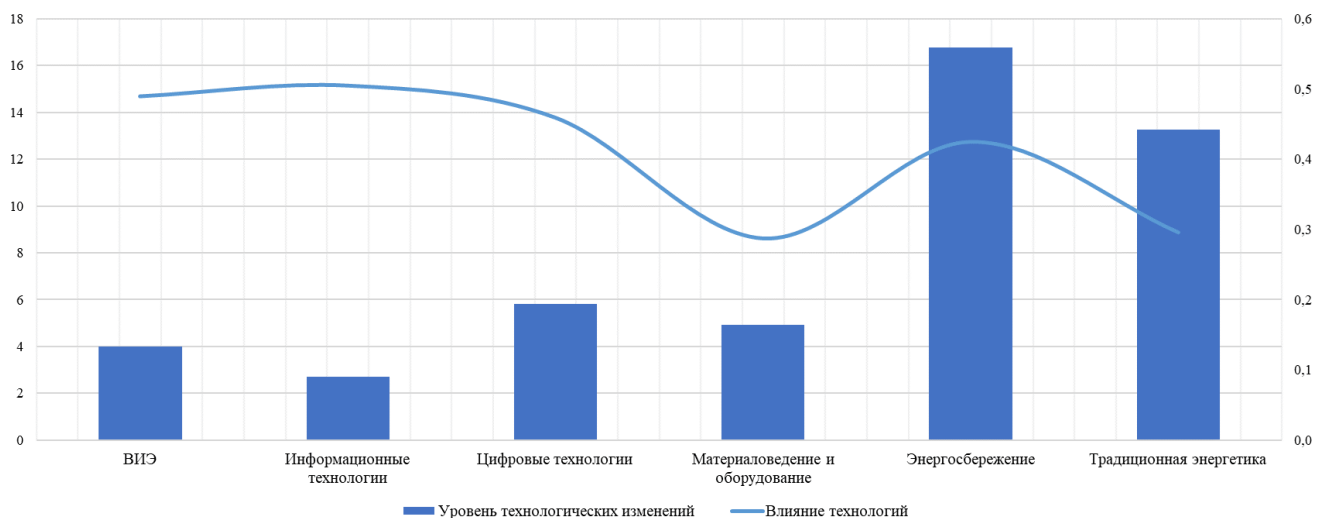


Рисунок 4.14.2 – Коэффициент необходимых технологических изменений и степень их влияния на энергетическую инфраструктуру по результатам моделирования

4.15 Обобщенная карта определения технических воздействий

На основании моделей, представленных в предыдущих параграфах данной главы, разработана карта определения технических воздействий по видам структурных компонент ЭТК и критериям принятия решений (Рисунок 4.15.1).

		Зона воздействия	Критерии принятия решений по техническому воздействию	Компоненты электротехнического комплекса						
				Деталь	Узел оборудования	Единица оборудования	Группа оборудования	Технологическая цепочка	ЭТК	
Технические воздействия	N1	I	Техническое состояние	I	I					
	N2	II	СЖЦЭ (Стоимость жизненного цикла эксплуатации)		I	II				
	N3	III	Риски/Рост потребления энергии		II	II				
	N4	IV	Свойства систем			II	II			
	N5					II	II	III		
	N6					III	III	III		
	N7						III	IV	IV	
	N8							IV	IV	IV
				3 года		8 лет		10 лет		20 лет

Рисунок 4.15.1 – Карта определения технических воздействий в ЭТК ГиНГП на основе критериев

Таким образом, реализованное на основе данных цифрового двойника сценарное моделирование воздействия рисков, обусловленных глобальными вызовами на развитие потребителей, включая ГиНГП, и оценка изменения спроса на электроэнергию, позволяет определить изменения свойств ЭТК на жизненном цикле эксплуатации с учетом технологических изменений и физического износа ЭМО. Что в свою очередь позволяет посредством учёта взаимного влияния ТС ЭМО определить необходимые технические воздействия для функционирования ЭТК ГиНГП с учетом критериев экономической эффективности, потерь энергии и вредных выбросов на жизненном цикле эксплуатации.

4.16 Выводы по главе 4

1. Предложены критерии управления техническими воздействиями, параметры мониторинга и математические модели необходимые для учёта взаимного влияния фактического состояния и энергетических потоков структурных элементов систем энергообеспечения и энергопотребления с учётом сценарных условий функционирования и развития ЭТК ГиНГП.

2. Разработана классификация структур сетей сбора и обработки первичной информации при реализации распределенной системы управления жизненным циклом эксплуатации электромеханического оборудования, отличающаяся учетом ранжирования сценариев обмена данными, уровня тяжести последствий аварий и уровня цифровизации электротехнических комплексов.

3. Разработана методика оценки рисков безопасной и эффективной эксплуатации, базирующаяся на количестве неблагоприятных событий, обусловленных превышением или выходом наблюдаемых параметров за сформированные коридоры допустимых, критических и предельных значений. Определение рисков показателей энергоэффективности и надежности ЭМО для процессов добычи нефти на основе анализа неблагоприятных событий и сценарных условий изменения электропотребления от времени в изменяющихся условиях эксплуатации ЭТК показали, что наиболее высокая вероятность совместного неблагоприятного события наблюдается для электроприводов насосов добывающих скважин (20%) и для системы ППД (6,8%).

4. Проведен анализ вероятности возникновения дефектов для АД ПДД с учетом сценарной оценки потерь электрической энергии на стадии эксплуатации жизненного цикла ЭМО и на основе матрицы оценки рисков для АД в зависимости от вероятности возникновения дефектов и потерь электроэнергии, разбитой на 5 уровней, оценены риски для трех сценариев эксплуатации ЭТК. По результатам анализа установлено, что на начальной стадии эксплуатации суммарный риск выше, чем в нормальной стадии в 2 раза, а в стадии износа в 2,42 раза, что определяет необходимость контроля и анализа возникновения дефектов с целью снижения вероятности перехода на более высокий уровень матрицы рисков в зависимости как от роста потерь электроэнергии, так и от вероятности возникновения дефектов для анализируемых АД ПДД.

5. Предложена модель оценки СЖЦЭ на основе учёта режимов работы, потерь, обусловленных нагрузкой и конструкционными особенностями, стоимости потребляемой электроэнергии, ставки дисконтирования, стоимости ТОиР ЭМО, отличающаяся использованием при оценке установленного уровня

дополнительных потерь обусловленных наличием дефектов, а также стоимости и количества эквивалентных выбросов CO₂, на протяжении жизненного цикла с учётом диапазона сдвига плана ТОиР, что позволяет снизить потери электроэнергии и эквивалентные выбросы обусловленные наличием дефектов на этапе эксплуатации ЭМО.

6. Обоснована структура и методология функционирования цифрового двойника процесса управления техническими воздействиями в составе ЭТК ГиНГП, отличающаяся учетом дополнительных потерь электроэнергии и воздействия на окружающую среду, обусловленных наличием дефектов ЭМО, позволяющего обеспечить безопасное и эффективное управление ЭМО на жизненном цикле эксплуатации.

7. Разработан метод сценарного моделирования воздействия рисков на развитие ЭТК потребителей позволяющий оценивать изменение спроса на энергетические ресурсы, отличающийся учётом влияния конкурентного распределения энергетических ресурсов и оценки изменения свойств ЭТК на жизненном цикле эксплуатации при влиянии технологических изменений.

ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ СЕРВИСОВ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ С УЧЕТОМ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

5.1 Анализ архитектур построения сервисов

Учитывая тенденции в энергетике и ЭТК ГиНГП, рассмотренные в предыдущих главах, установлено, что развитие приобретают технологии промышленного интернета вещей [38], в связи с чем оборудование на большинстве современных предприятий оснащается различными интеллектуальными датчиками, позволяющими осуществлять непрерывный сбор данных. Сбор и обработка потоков данных представляет отдельную задачу, для которой рассмотрена классификация в 4 главе. При управлении этапом эксплуатации ЭМО необходимо учитывать сразу потоковые данные, исторические и различные инструкции и документы, регулирующие сроки и требования к эксплуатации оборудования [174]. Как рассмотрено в предыдущих главах, при мониторинге оборудования, факторов воздействия и влияния на безопасность и эффективность эксплуатации необходимо учитывать большой набор физических показателей. При этом реализуются различные подходы, как предварительной обработки данных, как можно ближе к источнику [278], так и сторонняя работа, в том числе с использованием облачных вычислений [218, 310]. Учитывая это, как отдельный элемент архитектуры выделяют слой передачи данных [251, 292], включающий различные сетевые технологии, а также актуальным является построение хранилища данных, эти вопросы не рассматриваются в представленной работе. Однако данные вопросы необходимо рассматривать с позиции активного использования при обработке данных, алгоритмов, основанных на методах машинного обучения. Результаты работы систем необходимо предоставить пользователю в визуальном формате, большинство программных продуктов поставляется с готовым пользовательским интерфейсом. Возможна также передача

данных в отдельные системы бизнес-аналитики [294, 304, 316], используемые в настоящее время в компаниях.

5.2 Комплексная архитектура взаимодействия сервисов децентрализованной системы управления жизненным циклом эксплуатации ЭМО в ЭТК МСК

Архитектуры систем управления ТОиР, повышения эффективности и управления надежностью оборудования достаточно схожи, поэтому целесообразна их интеграция в единое решение, что также создает условия для дальнейшей реализации цифрового двойника.

Ввиду развития концепции «все как услуга» (*X-as-a-Services, XaaS*) и развития промышленности в этом направлении, сервисы могут более полно раскрыть потенциал цифрового двойника [332]. Объединение данных с несколькими источниками требует алгоритмов, вычислительных услуг и услуг хранения. Поэтому предлагается рассмотреть построение ЦД управления безопасностью и эффективностью эксплуатации ЭМО как комплекс взаимосвязанных программных модулей и алгоритмов функционирования (сервисов), позволяющих повысить надежность, экономическую, энергетическую и экологическую эффективность электротехнических комплексов ГиНГП.

С точки зрения интеллектуального производства ЦД можно разделить на три уровня: уровень устройства, уровень системы и уровень *SoS (System of Systems)* [271]. ЦД на уровне системы можно рассматривать как интеграцию нескольких цифровых двойников отдельных единиц оборудования, которые взаимодействуют друг с другом (Рисунок 5.2.1). Несколько цифровых двойников на уровне устройства или несколько цифровых двойников на уровне системы составляют ЦД уровня *SoS* (например, цеха), то есть сложную систему. Основные атрибуты, состояние в реальном времени и другие данные передаются в виртуальные модели для управления моделированием и прогнозированием. Затем параметры виртуальных моделей возвращаются для управления физическими объектами. В процессе взаимодействия с обратной связью физические объекты и виртуальные

модели совместно эволюционируют (изменяются и улучшаются процессы). Учитывая это, концептуальная модель ЦД расширяется еще двумя уровнями – сервисы и данные (Рисунок 5.2.1). В результате трехмерная структура цифрового двойника расширяется до пятимерной, которая представляет собой физические объекты, виртуальные модели, сервисы, данные слияния и связи между ними.

Благодаря использованию цифрового двойника в эксплуатации, разработчики и проектировщики ЭМО могут быстро обнаружить узлы, требующие улучшения, т.к. используют единый источник информации [1].

Интегральная оценка состояния оборудования и объекта формируется как совокупность оценок всех узлов и подсистем, поэтому для электромеханического и электротехнического оборудования, рассматриваемого в технологической цепочке в целом, оценка состояния будет формироваться на основании параллельных цепочек из диагностических параметров по каждому выявленному дефекту.

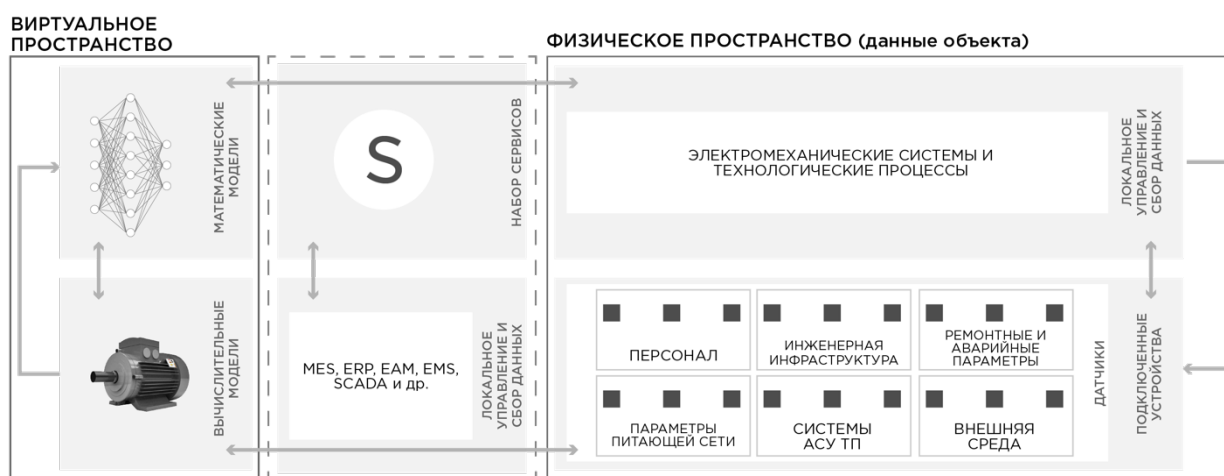


Рисунок 5.2.1 – Концептуальная модель сервисов в составе Цифрового двойника

Итоговый остаточный ресурс будет определяться наиболее быстро развивающимся и наименее поддающимся управлению дефектом. Имея полную информацию о выявленных дефектах и о возможном влиянии каждого из них на остаточный ресурс изделия, можно решить задачу определения объема восстановительных работ, необходимого для доведения ресурса работоспособности изделия до требуемого уровня. Располагая знанием о причинах возникновения каждого дефекта и факторах, влияющих на его развитие, можно

путём влияния на причины и факторы приостановить или замедлить развитие наиболее критичных дефектов, сберегая, таким образом, ресурс работоспособности, например, своевременно планировать объем и время мероприятий борьбы с АСПО или воздействия на пласт и другие мероприятия.

Исходя из исследований, проведенных в предыдущих главах, можно определить набор необходимых сервисов и архитектуру «цифрового двойника», ориентированного на управление безопасностью и эффективностью эксплуатации ЭМО в структуре ЭТК ГиНГП, включая ориентир на достижение целей устойчивого развития. Опираясь на тенденцию снижения углеродного следа и определения наиболее важных контуров управления в данном векторе, представленная архитектура взаимодействия охватывает персонал [1], инфраструктуру и физические данные объекта и окружающего пространства.

Предлагаемый комплекс взаимосвязанных программных модулей и алгоритмов, интегрированный посредством *IoT* для ПСТОиР (Рисунок 5.2.2), начинается с датчиков и сенсоров нового поколения, имеющих встроенные средства передачи информации. Большие массивы данных (*Big Data*), которые они создают, превращаются в информацию и знания посредством анализа в децентрализованных интеллектуальных сервисах, образующих системы мониторинга, оценки, диагностики, прогнозирования и др. «Подключенность» устройств позволяет не только глобализовать данные, но и совместно накапливать и использовать знания в виде специальных сервисов (*SaaS*), что дает быстрый экономический эффект за счет исключения дублирования информации и полученных знаний. Предлагаемые сервисы позволяют улучшить анализ и использование эксплуатационных данных, а также выявить их ценность для различных служб.

Децентрализация открывает возможности по использованию диагностических комплексов моделирования на реальном оборудовании и математических моделях, позволяющих с помощью сервисов элементарных динамических звеньев объединять их в подсистемы для формирования эталонных или прогнозных предельных значений диагностических параметров. Интеграция

сервисов динамического моделирования в системы управления жизненным циклом ЭМО позволит автоматически ограничивать загрузку, переводя оборудование в более «щадящие режимы» работы, чтобы не допустить излишних простоев или аварийной остановки.

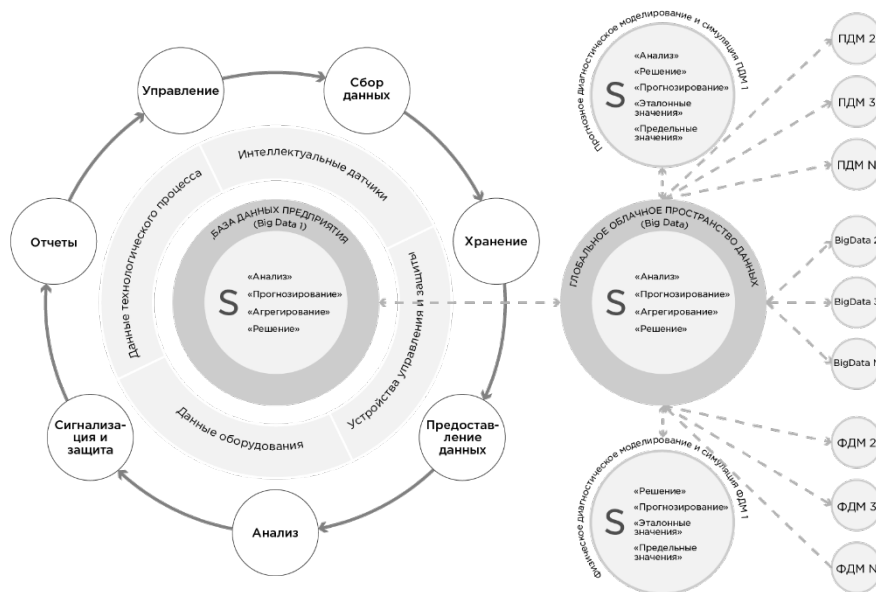


Рисунок 5.2.2 – Структура комплекса взаимосвязанных программных модулей и алгоритмов функционирования в составе системы управления жизненным циклом эксплуатации электромеханического оборудования

Главными элементами системы, структура которой представлена на (Рисунок 5.2.2), являются базы данных, причем реализация баз данных должна иметь две различные формы – частная база данных, которая используется на предприятии, так называемая «частная область данных», а также глобальная база данных, которая используется всеми, кому необходима информация по данному оборудованию. Каждая частная область данных, используемая на предприятиях, может быть интегрирована в единую глобальную информационную систему. Единая глобальная информационная система – это система, способная к самообучению и адаптации к изменениям различных условий. Следовательно, система в целом и ее части в частности могут функционировать в различных условиях, агрегировать данные различных частных баз данных, производить и собирать специальные знания в течение жизненного цикла электромеханического оборудования. Появление мощных аналитических инструментов, позволяющих оперировать накопленными данными в режиме, близком к реальному времени,

открывает новые возможности в области построения систем прогнозирования и управления загрузкой оборудования, а также мероприятиями по дополнительному обеспечению участия оборудования в реализации алгоритмов повышения эффективности и обеспечению безопасной эксплуатации. При этом каждая единица ЭМО наделяется «интеллектом» без необходимости единой интеллектуальной системы автоматизации посредством сервисной архитектуры.

Комплекс взаимосвязанных сервисов образует ЦД ЭМО в структуре ЭТК ГиНГП, ориентированный на управление безопасной и эффективной эксплуатацией, который состоит, но не ограничивается следующими сервисами (Таблица 5.2.1).

Таблица 5.2.1 – Описание эффектов и средств реализации комплекса сервисов, образующих ЦД процесса управления безопасной и эффективной эксплуатацией ЭМО

Сервисы	Средства реализации	Эффекты
Сбора первичных данных для анализа диагностических параметров	Фильтрация, базы данных	Увеличение доступности данных
Мониторинга диагностических параметров	Фурье анализ, Фильтрация,	Снижение рисков аварий, повышение безопасности, снижение количества внезапных остановок
Прогнозирование развития дефектов	Машинное обучение, статистика	Снижение числа поломок, снижение затрат на ТОиР
Обнаружения аномалий и пополнения базы данных	Окна функций, триггеры	Повышение эффективности диагностики, повышение качества прогнозирования ТС
Сервисы формирования синтетических данных	Динамическое моделирование, имитационное моделирование	Повышение качества прогнозирования, уменьшение времени интеграции алгоритмов
Обнаружение ранней стадии развития дефектов	Разложение временных рядов	Повышение качества прогнозирования, снижение затрат энергии, снижение вредных выбросов, снижение затрат на ТОиР
Обнаружения и восполнения недостающих данных	Глобализация данных, машинное обучение	Повышение качества прогнозирования
Формирования цифровых моделей	Машинное обучение, комплексы цифрового моделирования	Повышение качества прогнозирования
Дополненная реальность	Передача данных, компьютерное зрение	Улучшение качества ремонтов, снижение времени обслуживания и ремонта, повышение безопасности персонала

Продолжение таблицы 5.2.1.

Анализ поведения персонала	Машинное обучение, статистика	Улучшение качества ремонтов, повышение безопасности персонала
Формирования программы обучения персонала	Машинное обучение, статистика	Повышение культуры производства, повышение качества ремонтов
Управления ТОиР	Имитационное моделирование, машинное обучение, статистика, оптимизация	Снижение затрат на ТОиР, снижение потерь энергии, снижение выбросов
Управления спросом на электроэнергию ЭМО	Оптимизация	Снижение стоимости жизненного цикла эксплуатации
Учета углеродного следа	Распределенный реестр, интернет вещей	Снижение выбросов
Анализа и прогноза энергопотребления и показателей энергоэффективности	Машинное обучение, статистика	Снижение потерь энергии, повышение энергетической эффективности

Отдельные сервисы, такие как сервисы мониторинга, диагностики и прогнозирования, вместе представляют собой часть сервиса управления эксплуатацией, который связан с внешними информационными системами, а также другими сервисами и сервисами других цифровых двойников (Рисунок 5.2.3).

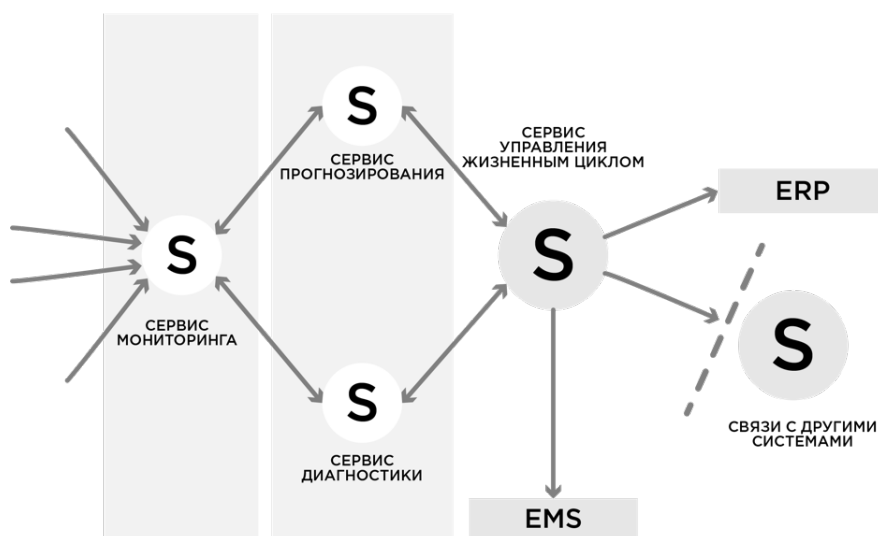


Рисунок 5.2.3 – Взаимосвязь сервисов внутри архитектуры цифрового двойника

Для реализации комплексных функций системе необходимо иметь логику, уметь рассуждать, используя факты и правила. Система должна оперировать большими данными и быть интеллектуальной, самостоятельно определяя на основе

базы знаний, регламентных значений и другой информации границы фиксируемых сигналов и параметров. Одной из важнейших функций является умение прогнозировать дальнейшее поведение элементов ЭМО (например, электрического двигателя, входящего в состав насосных систем), подбирать оптимальные параметры работы, анализировать и прогнозировать развитие дефектов и на основе прогноза влиять на загрузку агрегата. Для реализации этих функций необходимо находить зависимости сигналов от спектра параметров в больших данных собранной информации. Осуществлять быстрый поиск информации о причинах поломок, видах дефектов с целью управления техническим состоянием посредством влияния на параметры, от которых оно зависит.

5.3 Сервисы анализа и прогноза энергопотребления

Одной из глобальных целей внедрение сервисов цифрового двойника в производство является оптимизация процессов и повышение их эффективности. ГиНГП ориентированы на снижение себестоимости продукции за счет энергозатрат на разработку, извлечение и транспортировку углеводородов и полезных ископаемых. Для каждого из процессов выделяются показатели энергоэффективности (Таблица 5.3.1).

Таблица 5.3.1 – Критерии для сервисов анализа и прогноза энергопотребления на примере добычи нефти:

Направление (группа процессов)	Критерии эффективности
Разработка месторождения	Переменная часть затрат по статьям: электроэнергия на подъем жидкости из пласта, сбор и транспортировка нефти, содержание и эксплуатация оборудования, поддержание пластового давления (снижение); Капитальные вложения (снижение); Потребление электроэнергии и сопутствующие расходы (снижение); Нефтеотдача пластов (повышение); Объемы извлечения попутной воды (снижение или не повышение);
	Экологическая безопасность и безопасность жизнедеятельности (повышение).
Добыча нефти	Потребление электроэнергии и энергозатраты (снижение); Межремонтный период УЭЦН (увеличение).

Продолжение таблицы 5.3.1.

Сбор и транспортировка нефти, воды	Потребление электроэнергии и энергозатраты (снижение); Снижение эквивалентных выбросов; Прорывы трубопроводов (аварийность), затраты на ликвидацию последствий аварийных событий (снижение); Экологическая обстановка (улучшение); Состояние здоровья персонала (улучшение).
Оборудование	Потери, потребление электроэнергии и энергозатраты (снижение); Потребление тепловой энергии и сопутствующие затраты (снижение); Плата за природопользование (снижение); Эксплуатационные затраты (снижение); Экологическая обстановка (улучшение).

Примечание: таблица составлена на основании [40, 336]

Таблица 5.3.2 – Ключевые показатели энергоэффективности и энергосбережения для контроля и прогнозирования сервисами:

Наименование показателя	Ед. изм.	Формула расчета, обозначения
Потребление энергии: электрической тепловой	кВт·ч Гкал	E_e, E_n
Доля энергозатрат	%	$C_e = E/C$ C – эксплуатационные затраты на добычу
Потребление энергии в усл.ед.	т.у.т.	$E = E_e \cdot k_e + E_n \cdot k_n$ $k_e = 0,12284 \cdot 10^{-3}$ и $k_n = 0,14286$ – переводные коэффициенты для электрической и тепловой энергии из физических в условные единицы
Удельный расход энергии на добычу 1 тонны жидкости	$\frac{т. у. т.}{т}$	$\bar{E} = \frac{E}{Q_{ж}} = \frac{E}{q_{ж} \cdot t}$ где $Q_{ж}$ – добыча жидкости, т; t – время работы скважины в добыче, сут; $q_{ж}$ – дебит жидкости скважины
Удельный расход энергии на добычу 1 тонны нефти	$\frac{т. у. т.}{т}$	$\bar{E} = \frac{E}{Q_n} = \frac{E}{q_n \cdot t}$ где Q_n – добыча нефти, т; q_n – дебит жидкости скважины и Q и q
Показатель снижения удельного расхода энергии	$\frac{т. у. т.}{т}$	$\Delta \bar{E} = \bar{E}_i - \bar{E}_{i-1}$ где \bar{E}_i, \bar{E}_{i-1} – удельные расходы энергии на i -й и $(i-1)$ -й периоды реализации программы энергосбережения, где $i = 1..n$, т.у.т./т
Экономия ТЭР в результате энергосберегающих мероприятий	т.у.т.	$\Delta E = E_i - E_{i-1}$

Продолжение таблицы 5.3.2.

Снижение энергетических затрат	руб.	$V_E = \Delta E \cdot p$ <p>где $\Delta E = E_i - E_{i-1}$ – изменение расхода энергии с $(i-1)$-го по i-й период вследствие реализации программы энергосбережения, где $i = 1..n$, кВт·ч или Гкал; p – цена энергоносителя, руб./кВт·ч или руб./Гкал</p>
--------------------------------	------	--

Примечание: таблица составлена на основании [40, 336, 56]

5.4 Разработка сервиса диагностики

Для построения цифрового двойника необходимо формирование эталонных моделей. Виды данных, используемых в эталонной модели:

- данные системного и численного моделирования;
- техническая и чертежная документация, протоколы;
- оцифрованный экспертный опыт (исторические данные);
- оцифрованные действия персонала (операционные данные);
- результирующие данные, полученные из блока машинного обучения и статистики;
- эксплуатационные данные;
- управляющие и физические сигналы;
- данные окружающей среды.

Для выбранного объекта параметры можно разделить на управляющие и расчетные.

Таблица 5.4.1 – Управляющие параметры и расчетные характеристики (пример)

Управляющие	Расчетные	Расчетные характеристики для калибровки системной модели
Напор	Остаточный ресурс	Расход
Ток электродвигателя	Температура нефтепродукта	Скорость
Температура окружающей среды	Температура корпуса ЭД	Давление

Одной из важных составляющих работы цифрового двойника является разработка модуля диагностики, контроля технического состояния и оценки

остаточного ресурса электромеханического оборудования [322]. Далее приведено описание этапов с указанием организационных мероприятий.

Схема процессов разработки и внедрения сервиса диагностики (Рисунок 5.4.1). Рассмотрим более подробно некоторые из перечисленных этапов.

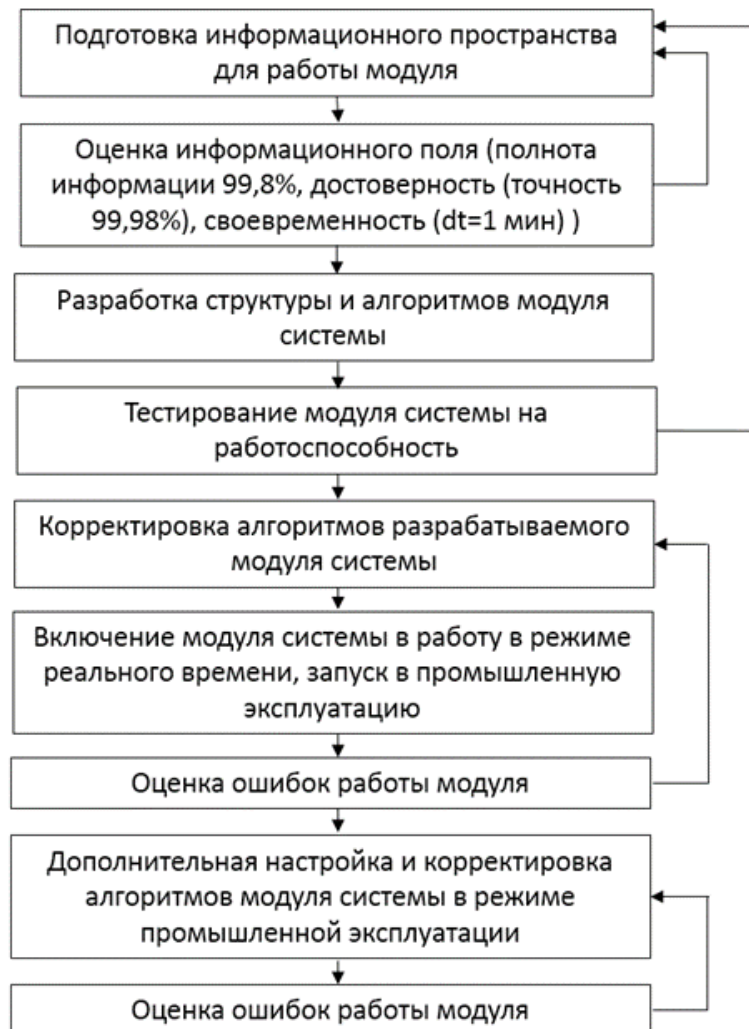


Рисунок 5.4.1 – Схема разработки сервиса диагностики

Подготовка информационного пространства для работы модуля системы является самым важным и критически необходимым для создания разрабатываемого модуля диагностики [332]. Информационное поле формируется на основе принимаемых решений, какая информация нужна для работы системы, каковы ее объемы, периодичность поступления, организация сбора и обработки информации, организация хранения информации и настройка информационного обмена между различными частями системы. Кроме того, изначально на данном

этапе принимается решение о составе информационного массива данных, по которому будет проводиться разработка аналитических модулей системы.

Затем проводится оценка насыщенности или достаточности информационного поля системы. В том случае если информационное поле окажется недостаточным, необходимо предпринять соответствующие меры для увеличения информационного поля системы до нужных размеров с помощью специальных методов косвенных вычислений; кроме того, могут быть использованы так называемые «Интеллектуальные датчики» – специальные модули, позволяющие прогнозировать значения параметров и решать вопросы сокращения информационной недостаточности.

Результаты деления перечня информации информационного поля на классы для первоначальной разработки структуры системы (Таблица 5.4.2).

В условиях полнофункциональной работы системы сформированное информационное поле будет содержать два типа данных – исторические данные и данные реального времени. В процессе разработки и тестирования алгоритмов используются только исторические данные. При этом массивы данных являются основой для формирования алгоритмов, поэтому для формирования массивов необходимо выполнить процесс кластеризации, осуществляющий соотнесение параметров к одному из сформированных классов.

Также необходимо провести ряд экспериментов в условиях реального производства в режиме реального времени для оценки достоверности и своевременности информации. При этом перед проведением данной оценки необходимо структурно организовать процесс сбора и хранения информации, используемой модулем диагностики, а также правильно настроить информационный обмен со смежными системами.

Таблица 5.4.2 – Перечень и классификация информационных параметров необходимых для работы модуля диагностики оборудования [329]

Наименование группы параметров	Возможное наименование параметров, входящих в данную группу
Технические характеристики машины и оборудования	Время работы, данные техобслуживания, ремонта оборудования, параметры эксплуатации машины
Интеллектуальные вычисления	Относительный возраст машины (определение % жизненного цикла)
Данные об известных дефектах	Дефект 1...n (есть или нет, если возможно определение фактического значения, например, путем квитирования и подтверждения прогнозируемых системой дефектов)
Технологические данные процесса	Скорость, загрузка, прочие параметры технологических процессов комплекса, обслуживаемого диагностируемым оборудованием
Прямые параметры диагностики	Действующие значения тока и напряжения, мгновенные значения мощности, токи утечки и пр.
Косвенные параметры диагностики	Межвитковые замыкания, дефект контактных соединений, повреждение межфазной изоляции и пр.
Расчетные параметры аналитического модуля	Вероятность дефекта через 5, 15 минут, 12, 24 часов, 1, 3 месяцев, 1 год
Параметры настроечных и весовых коэффициентов для реализации аналитических вычислений	Весовые коэффициенты для работы подсистем модуля, экспертные оценки как переменные (для первоначальных настроек системы) и пр.
Параметры действий оператора и прочего оперативно-технологического и обслуживающего персонала	Пуск/Останов оборудования, квитирование аварий, дефектов и прочие действия
Дополнительная информация для работы системы	Переменные, значение которых используются для организации информационного обмена, синхронизации работы модуля и его подсистем, и прочие параметры

5.4.1 Сервис прогнозирования развития дефектов

В первую очередь при разработке структуры и алгоритмов модуля системы необходимо выделить дополнительные подсистемы, решающие проблемы информационной недостаточности. Для рассматриваемой задачи целесообразно проводить разработку следующих подсистем:

- подсистема оценки жизненного цикла оборудования;
- подсистема прогнозирования развития дефекта;

- подсистема интеллектуального определения параметров работы оборудования в период между проведением диагностики (подсистема, решающая задачи информационной недостаточности);
- подсистема формирования части информационного поля системы из информационной базы данных предприятия.

Для решения аналитических задач модулем диагностики и с учетом выделенных подсистем может быть использована система, структурная схема которой представлена на (Рисунок 5.4.2)



Рисунок 5.4.2 – Структурная схема прогнозирования развития дефектов

5.4.2 Разработка сервиса сбора первичных данных для анализа тока

Разработана платформа с архитектурой на (Рисунок 5.4.3). Разработана платформа с клиент-серверной архитектурой.

Сервер – это программное обеспечение, которое ожидает запросов клиентов и обслуживает или обрабатывает их соответственно. Программная реализация выполнена на языке *Python* (Пайтон) и интерфейса *Socket* (сокет) для обмена данными между клиентами и сервером. При использовании сокета можно реализовать децентрализованную систему, путем развертывания сервера и клиента

на разных аппаратных мощностях электронная вычислительная машина (ЭВМ), связанных собой только сетью (*Internet* или *Intranet*). Сервер выполняет сбор данных с устройств нижнего уровня и сохраняет данные в базу с помощью ТСП или распределённого программного брокера сообщений с открытым исходным кодом *Kafka*, что обеспечивает создание горизонтально масштабируемой платформы для обработки потоковых данных в реальном времени с высокой пропускной способностью и низкой задержкой.

В качестве базы данных для небольших систем может использоваться *PostgreSQL*, созданная на основе некоммерческой системы управления базами данных *Postgres*. *PostgreSQL* свободная объектно-реляционная система управления базами данных (СУБД). А для больших и сильно распределённых систем рекомендуется использовать *NoSQL* – широкий класс разнородных СУБД, отличающихся от традиционных реляционных СУБД использованием не только *SQL* запросы, позволяющих создание параллельных распределённых систем для высокомасштабируемых интернет-приложений.

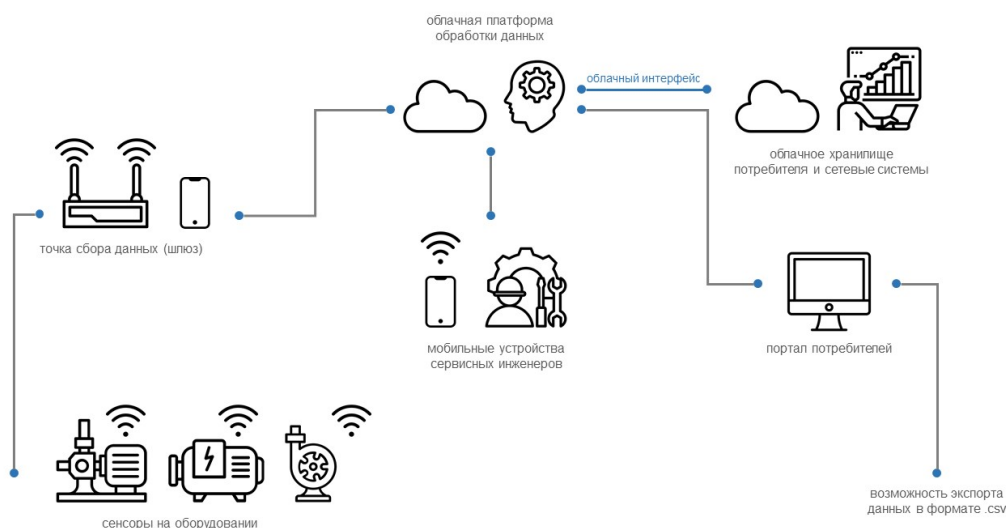


Рисунок 5.4.3 – Архитектура сервиса сбора первичных данных

Клиент реализован на языке программирования *JavaScript* с применением фреймворка *Angular* (открытая и свободная платформа для разработки веб-приложений, написанная на языке *TypeScript*, расширяющем возможности *JavaScript*).

Web-платформа https://digital.spmi.ru/stand_demo/charts (Рисунок 5.4.4):

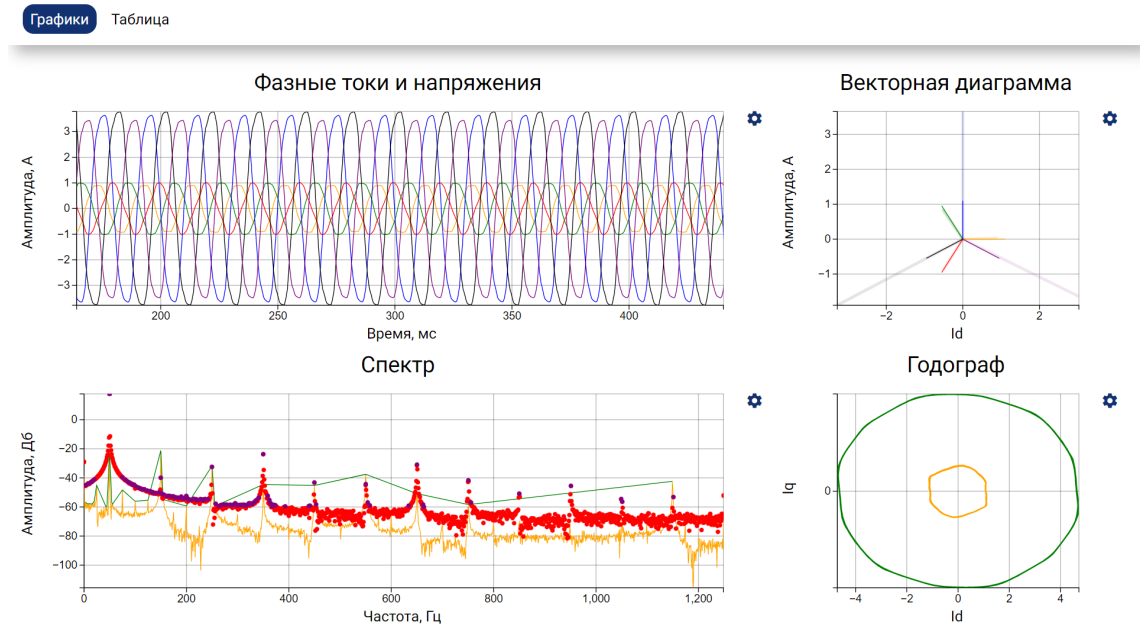


Рисунок 5.4.4 – Интерфейс разработанного сервиса сбора первичных данных

При разработке сервиса была реализована среда для проверки и верификации алгоритмов поиска неисправностей (Рисунок 5.4.5):

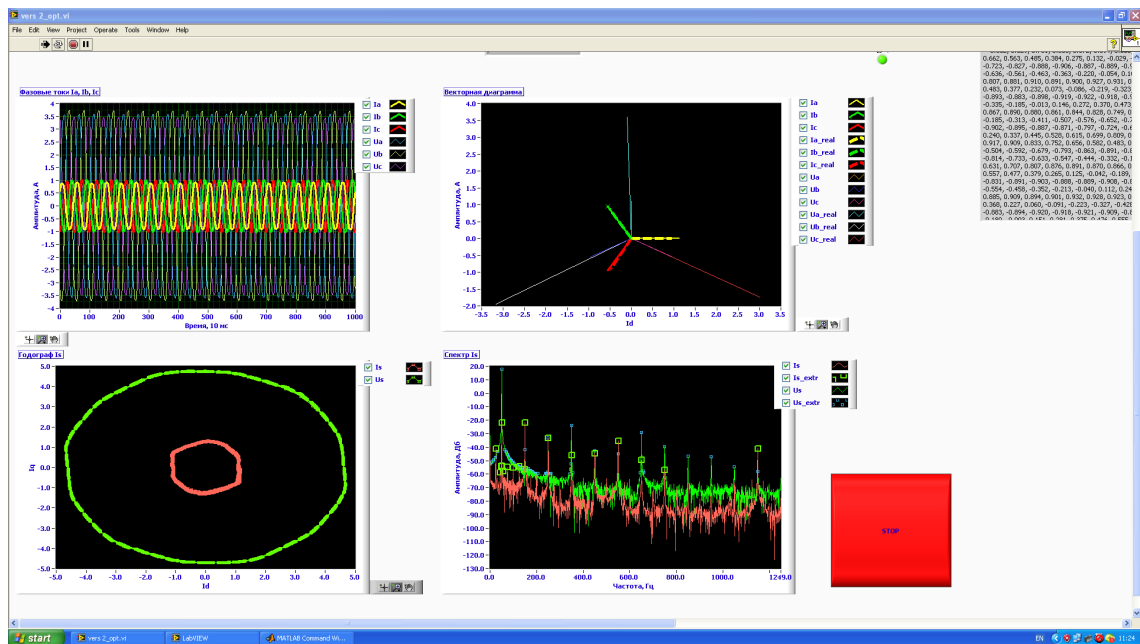


Рисунок 5.4.5 – Реализация среды для лабораторных исследований моделирования и поиска дефектов ЭМО

5.4.3 Сервис управления ТОиР

При построении сервисов управления ТОиР основное внимание уделяется прогнозированию процесса деградации, базирующемуся на предположении, что

большинство отклонений не происходят мгновенно, и есть период времени, который необходим для процесса деградации, что выражается в постепенном изменении диагностических параметров от нормальных до критических отклонений. ПСТОиР фокусируется не только на обнаружении дефектов и диагностике компонентов, но также на контроле износа и прогнозировании появления дефектов, что позволяет избежать ненужных задач обслуживания, выполняя действия по обслуживанию только когда есть признаки ненормального поведения оборудования. Это, в свою очередь, снижает затраты на техническое обслуживание за счет сокращения количества ненужных плановых профилактических операций по техническому обслуживанию, что позволяет выявлять и решать проблемы заранее, прежде чем произойдет повреждение. Системы, основанные на прогнозировании с точки зрения повышения безопасности, более предпочтительны, поскольку, заранее обнаруживая риски, возможно выполнять более качественное ТОиР, исключая ненужные проверки, а также правильно планировать мероприятия по устранению причин изменения рисков.

Процесс реализации алгоритмов прогнозирования, которые предоставляют базовую информацию о состоянии для следующих процессов, базируется на понимании того, какие данные следует собирать в течение периода использования. Данные, собранные в системе, можно разделить на два основных типа: данные о событиях, данные мониторинга состояния и данные о прецедентах. Данные о событиях включают информацию о том, что произошло (например, установка, поломка, капитальный ремонт, мероприятия АСПО и каковы были причины). Данные мониторинга состояния – это измерения, связанные с состоянием оборудования. Данные о прецедентах – это события, извлеченные из накопленных данных – длительность и величина несимметрии питающего напряжения, отклонение длительности пуска более эталонного, появление новых компонент сигналов при анализе тока или мощности и т.д. Модели, алгоритмы и инструменты, используемые для анализа данных, зависят главным образом от типов собираемых данных.

Таким образом, необходимо анализировать данные событий, данные мониторинга и прецедентов вместе. Этот комбинированный анализ данных выполняется путем построения математических модели, которые должным образом описывают основные механизмы деградации или внезапной остановки оборудования. При принятии решения о ТОиР для анализа требуется алгоритм, который оценивает наличие дефекта и его изменение, на основе чего строится прогноз оставшегося времени до отказа ЭМО.

На основе комплексного анализа методов диагностики и алгоритмов, рассмотренных во второй и третьей главах была разработана структура сервиса управления ТОиР, который использует не только электрические параметры, но и параметры, которые доступны от других датчиков, используемых в технологическом процессе (Рисунок 5.4.6).

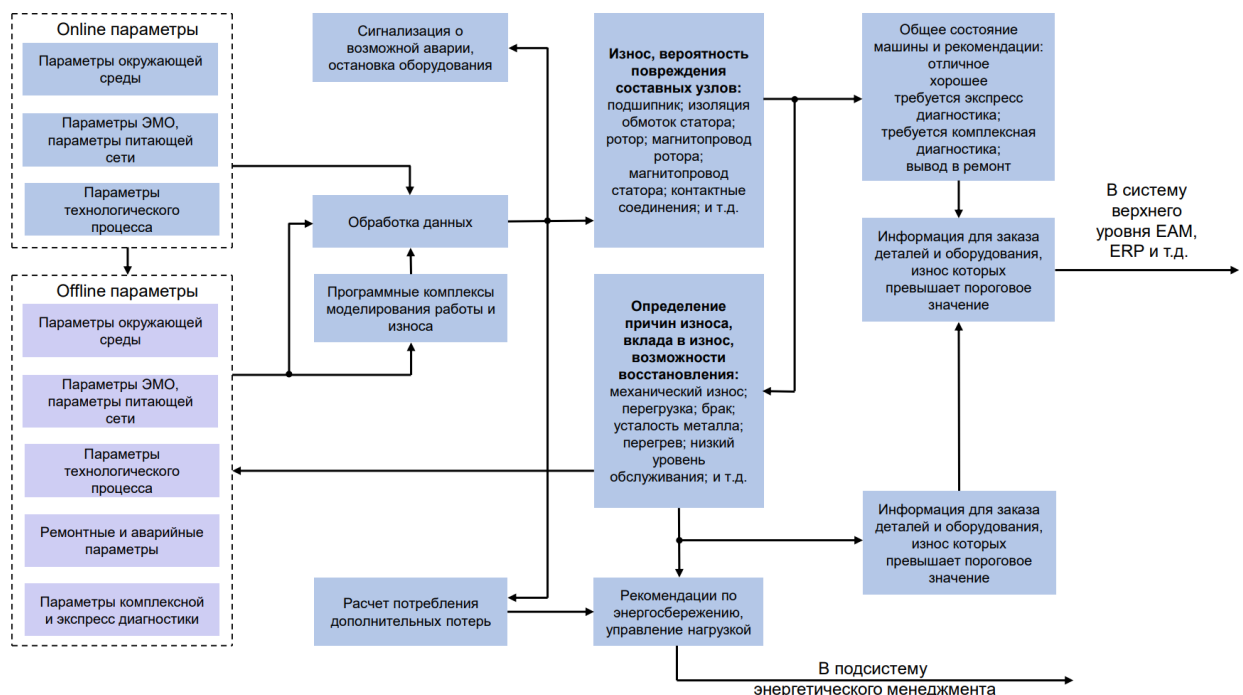


Рисунок 5.4.6 – Структурная схема сервиса управления ТОиР ЭМО

Данные для сервиса управления ТОиР ЭМО разбиты на *Online* параметры и *Offline*. *Online* параметры необходимы для оперативного контроля и управления в режиме реального времени, при котором «прогнозирование» сводится лишь к обеспечению безаварийной работы ЭМО, то есть своевременное обнаружение аварийных режимов работы и разработка мероприятий по их предотвращению. На

основании обработки данных *Online* параметров сервис сможет заблаговременно сигнализировать о возможной аварии и остановить оборудование в случае необходимости.

Offline параметры необходимы для последующего моделирования и прогнозирования как на короткий, так и на длительный интервал времени, что, в свою очередь, позволит рационально организовать плановые ремонты, вывод оборудования из работы и заказ запасных частей.

В случае выявления в результате оперативного контроля и прогнозирования признаков дефектов проводится более глубокий анализ данных с использованием моделирования состояния ЭМО в различных режимах нагрузки с учетом внешних факторов. Диагностика и прогнозирование отказов основана на сравнении доступных измерений системы с априорной информацией, представленной математической моделью системы, посредством формирования эталонных и прогнозных данных работы оборудования и анализа их изменений [131, 155, 333]. На основании совокупности входных данных сервис формирует отчет об износе отдельных элементов и узлов ЭМО и о вероятности выхода их из строя на определённом промежутке времени. На следующем этапе определяются причины износа и их вклад в износ. На основании этих знаний принимается решение об управлении нагрузкой и о заказе запасных частей, износ которых превышает пороговое значение. Имея полную информацию о выявленных дефектах и о возможном влиянии каждого из них на остаточный ресурс, сервис определяет объём восстановительных работ, необходимых для доведения ресурса ЭМО до требуемого уровня. Располагая знанием о причинах возникновения каждого дефекта и факторах, влияющих на его развитие, путём влияния на причины и факторы наиболее критичные дефекты на основе сформированных программ по управлению рисками приостанавливаются или замедляются, сберегая, таким образом, ресурс работоспособности.

Отдельная составляющая сервиса управления ТОиР ЭМО – алгоритм расчета дополнительных потерь, которые возникают в результате дефектов и значительного износа деталей, неудовлетворительном качестве питающего

напряжения, перегреве или не оптимальной работы ЭМО, по этим данным выдаются рекомендации по программам энергосбережения и повышению энергетической эффективности.

5.5 Разработка сервиса для формирования синтетических данных параметров узла нагрузки

В основе «цифрового двойника» лежит как математическая модель, так и её компьютерная реализация. В данной части исследования рассматривается возможность построения динамической модели для использования совместно с интеллектуальными сервисами узла системы электроснабжения нефтедобывающего предприятия. Набор данных динамических моделей может использоваться как для информационного наполнения баз оценки рисков, так и для использования алгоритмами прогнозирования. Также учитывая мировую тенденцию по применению динамического моделирования для «виртуального запуска производства» необходимо строить архитектуру «цифрового двойника» с учетом использования созданных математических и компьютерных моделей.

Динамическое моделирование (или моделирование динамической системы) – это использование компьютерной программы для моделирования, изменяющегося во времени поведения динамической системы, в рассматриваемом случае системы электроснабжения и технологического процесса, включая ЭМО. Системы обычно описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями или уравнениями в частных производных. В ходе моделирования решается система уравнений состояния, чтобы найти поведение переменных состояния в течение заданного периода времени. Уравнение решается с помощью методов численного интегрирования для получения переходного поведения переменных состояния. Моделирование динамических систем предсказывает значения переменных состояния модель-система, поскольку они определяются прошлыми значениями состояния. Эта взаимосвязь определяется путем создания модели системы.

Для проведения экспериментов по моделированию поведения электросетевого комплекса отдельного куста использовалась среда динамического

моделирования *AVEVA Dynamic Simulation*, в частности, пакет *ElecSolve*, включающий в себя элементы сети электроснабжения: шины, генераторы, выключатели, электрические машины и прочее. Было произведено построение модели участка сети электроснабжения и технологического участка системы поддержания пластового давления.

После построения имитационной модели (Рисунок 5.5.1) была проведена верификация каждого элемента в отдельности, а потом – в составе комплекса кустовой насосной станции. Процедура верификации подразумевает оценку функциональной полноты, точности и достоверности с использованием доступной информации.

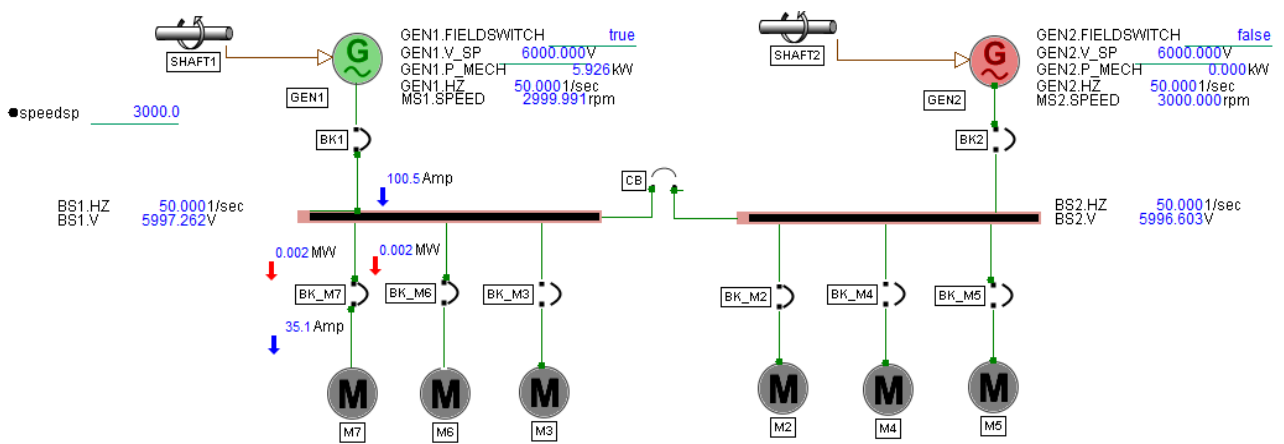


Рисунок 5.5.1 – Имитационная модель энергетической части

Для построения моделей двигателей были взяты их номинальные параметры (мощность, коэффициент мощности, скольжение и другие). Верификация моделей асинхронных двигателей проводилась посредством снятия скоростной диаграммы, сверки значений пусковых и номинальных токов, потребляемой мощности, значения коэффициента мощности. Насосное оборудование было проверено по показаниям развиваемого напора и расхода.

Рассмотрим элементы модели по отдельности:

Генератор (GEN)

Параметризация: во время разгона машины скорость определяется приведенной механической мощностью (*PMECH*) и инерцией машины (*H*). Когда выключатель цепи возбуждения замкнут, скорость машины является функцией

баланса электрической мощности (P) и механической мощности ($P_{МЭС} H$) и инерции машины. Когда машина синхронизируется с другими машинами, на машину действуют сильные синхронизирующие силы, которые заставляют все машины работать с одинаковой скоростью (в установившемся состоянии). Скорость группы синхронизированных машин определяется балансом общей механической мощности, полной электрической нагрузки и полной инерции вращения.

Модель (Рисунок 5.5.2) представляет собой систему возбуждения генератора-выпрямителя с высоким начальным откликом и полевым управлением. Главный возбудитель генератора переменного тока используется с неуправляемыми выпрямителями.

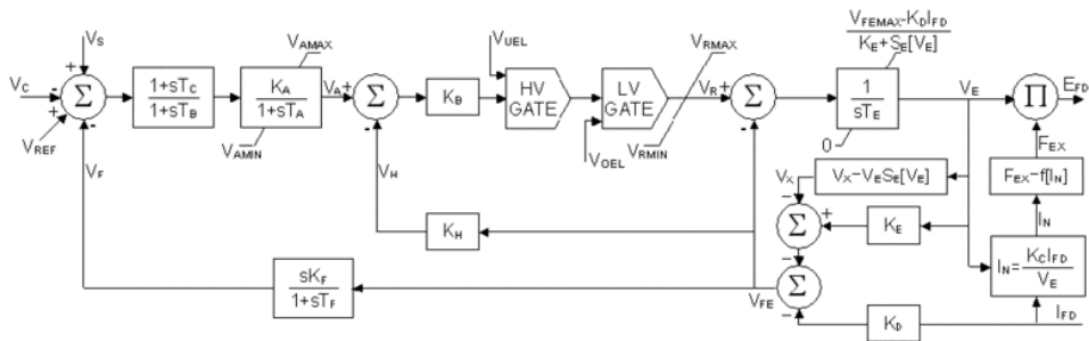


Рисунок 5.5.2 – Система возбуждения генератора

Компенсация постоянной времени возбудителя состоит из отрицательной обратной связи (VH) вокруг постоянной времени поля возбудителя, уменьшающей ее эффективное значение и тем самым увеличивая полосу отклика слабого сигнала системы возбуждения.

Постоянная времени уменьшается на коэффициент, пропорциональный произведению коэффициентов усиления, KB и KH , компенсационного контура и обычно более чем на порядок ниже постоянной времени без компенсации.

Чтобы получить высокий начальный отклик в этой системе, к полю возбудителя прикладывается очень высокое напряжение форсирования ($VRMAX$). Ограничение тока возбуждения возбудителя позволяет обеспечить высокое напряжение, но ограничивает ток. За счет ограничения тока возбуждения возбудителя выходное напряжение (VE) возбудителя ограничивается выбранным

значением, которое обычно определяется заданной номинальной характеристикой системы возбуждения. Хотя этот предел физически реализуется посредством контура обратной связи, постоянные времени, связанные с контуром, могут быть чрезвычайно малы и могут вызывать вычислительные проблемы. По этой причине ограничитель показан в модели как положительный предел напряжения возбудителя против коммутирующего реактивного сопротивления, которое, в свою очередь, зависит от тока возбуждения генератора. Для малых постоянных времени контура ограничителя это имеет тот же эффект, но позволяет обойти вычислительную проблему, связанную с контуром с высоким коэффициентом усиления и низкой постоянной времени.

Источник (система GEN + SHAFT)

В целях повышения качества результатов моделирования для эквивалентирования источника электрической энергии была построена модель, включающая в себя генератор (*GEN*) и вал (*SHAFT*). Используя заводские параметры генератора (мощность, скорость вращения), зададим модель первичного двигателя (турбины/рабочего колеса) при помощи простой системы уравнений в параметрах модели вала. Для начала был создан параметр, задающий уставку скорости, создадим его при помощи точки (*SPEEDSP*). Далее необходимо создать модель первичного двигателя. Реализуем его при помощи уравнений, которые в совокупности будут представлять собой простой ПИ-регулятор, уставкой которого будет являться синхронная скорость вращения ($SPEEDSP = 3000$ об/мин) генератора. Контроллер будет поддерживать скорость вала и генератора на уровне уставки, регулируя механическую мощность (*JAPPLY*), подаваемую на вал извне.

Добавим следующие четыре вектора к модели вала в параметре *JAPPLY*:

$$JAPPLY(0) = SPEEDSP - GEN1.SPEED$$

$$JAPPLY(1) = LIMV((SHAFT1.JAPPLY[1] + SHAFT1.JAPPLY[0]), -1000, +1000)$$

$$JAPPLY(2) = SAFT1.JAPPLY[0] \cdot 1$$

$$JAPPLY(3) = 50 \cdot SHAFT1.JAPPLY[0] + 2 \cdot SHAFT1.JAPPLY[1] \cdot -10 \cdot \\ \cdot (SHAFT1.JAPPLY[2] - SHAFT1.JAPPLY[0])$$

Первый вектор – это сигнал ошибки. Второй параметр – это ограниченный $+/- 1000$ интегратор. Третий параметр – коэффициент демпфирования. Последний параметр – это выходной параметр, сам ПИ-регулятор. При значении уставки по частоте вращения вала на 3000 об/мин, система достигает устойчивого состояния за 15-20 секунд.

Двигатель

Асинхронная машина имеет два электрически активных элемента: ротор и статор в соответствии (Рисунок 5.5.3). Статор возбуждается переменным напряжением. Возбуждение статора создает вращающееся магнитное поле, которое вызывает токи в обмотках ротора. Эти токи, в свою очередь, взаимодействуют с вращающимся полем статора, создавая механический крутящий момент (5.5.1).

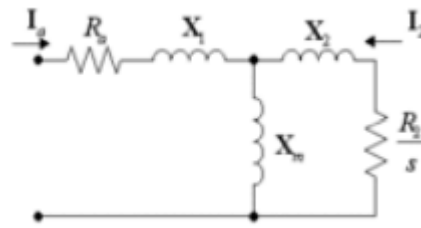


Рисунок 5.5.3 – Схема замещения, применяемая при имитационном моделировании

$$U_a = j(x_m + x_1)i_a + jx_2i_2 + R_a i_a \quad (5.5.1)$$

где x_1 – реактивное сопротивление статора Ом;

x_2 – реактивное сопротивление ротора, Ом;

x_m – реактивное сопротивление намагничивания, Ом;

R_a – сопротивление статора, Ом;

R_2 – сопротивление ротора, Ом.

Параметры эквивалентной схемы выводятся непосредственно из физических характеристик машины.

Используемые выражения (5.5.2).

$$W - pW_m = W_R \quad (5.5.2)$$

где W_R – электрическая частота ротора;

W_m – механическая скорость вращения, об/мин;

W – электрическая частота статора.

Скольжение машины составляет (5.5.3).

$$s = 1 - \frac{W_m}{W}. \quad (5.5.3)$$

Электрическая мощность, потребляемая машиной, составляет (5.5.4).

$$P_{in} = P_{ag} + P_a. \quad (5.5.4)$$

Мощность, пересекающая воздушный зазор, составляет (5.5.5).

$$P_{ag} = \left| \frac{I_t^2 R_a}{s} \right|. \quad (5.5.5)$$

Рассеиваемая мощность (5.5.6).

$$P_a = |I_t^2 R_a|. \quad (5.5.6)$$

Механическая мощность, производимая двигателем, составляет (5.5.7).

$$P_{out} = P_{ag} + P_W. \quad (5.5.7)$$

где P_W – суммарное сопротивление трения и паразитных потерь, Вт.

КПД (5.5.8).

$$n = \frac{P_{out}}{P_{in}}. \quad (5.5.8)$$

Коэффициент мощности (5.5.9).

$$\cos(\theta) = \frac{P_{in}}{V_t I_t}. \quad (5.5.9)$$

Модель адаптирована для представления двигателей с более высоким пусковым крутящим моментом путем включения коэффициента сепарации (5.5.10).

$$R_2 = R_2(0) \times (1 + K_g s). \quad (5.5.10)$$

Для расчёта модели двигателя необходимы параметры самого двигателя, а также обмоточные параметры или параметры схемы замещения.

Насос

Насос рассчитывает допустимый напор на основе перепада давления на нем. Объёмный расход интерполируется из предоставленной кривой производительности на основе рассчитанного напора (напорная кривая). Имитационная среда допускает обратный поток через остановленный насос.

Эффективность насоса характеризуется кривой, которая может быть указана вводом трёх и более точек кривой производительности или вводом одной

расчётной точки с использованием создания кривой «по умолчанию». Параметры $DHScale$ и $QScale$ используются для масштабирования напорной кривой насоса.

Насос имеет три рабочих зоны:

1. нормальная работа насоса, когда напор всегда положительный;
2. режим гидротурбины, где давление всасывания выше давления нагнетания;
3. область обратного течения жидкости, когда напора, развитого насосом, недостаточно для перекачивания жидкости против нагнетания.

Насос рассчитывает мощность на валу, расход жидкости и повышение энтальпии жидкости. Скорость потока жидкости вычисляется вне вала или двигателя и передаётся на насос механическим потоком. Насос устанавливает необходимую мощность в механическом потоке.

Развиваемый напор рассчитывается на основе перепада давления на насосе (5.5.11).

$$DN = \frac{1000 \cdot \Delta P}{9,81 \cdot R_f \cdot MW} \quad (5.5.11)$$

где DN – напор, м;

MW – молярная масса, кг/кмоль;

R_f – плотность входящего потока, кмоль/м³;

ΔP – депрессия на насосе, м.

Напорная характеристика используется для интерполяции значений объемного расхода (Q) на основе напора (DH) с использованием кубического сплайна или метода линейной интерполяции. Перед интерполяцией данные Q и DH корректируются с помощью соответствующих коэффициентов масштабирования и скорости.

Насос имеет дополнительный расчет $NPSH$ для прогнозирования кавитации. Значение $NPSHR$ по умолчанию равно нулю.

$NPSH$ рассчитывается по следующей формулам (5.5.12) – (5.5.13).

$$NPSHA = \frac{1000 \cdot (P_i + StHead - P_{vap})}{g \cdot R_f \cdot MW_f} \quad (5.5.12)$$

$$StHead = \frac{(iStrmEi - iStrmEx) \cdot g \cdot R_f \cdot MW_f}{1000} \quad (5.5.13)$$

где $NPSHR$ – требуемый чистый положительный напор на всасывании, м;

$NPSHA$ – имеющийся чистый положительный напор на всасывании, м;

P_i – давление на входе, кПа;

$StHead$ – статический напор, действующий на всасывании насоса, м;

P_{vap} – давление паров жидкости на входе в насос, кПа;

g – ускорение свободного падения, 9.80665 м/с²;

R_f – плотность на входе, кг*моль/м³;

MW_f – молекулярная масса входящей жидкости, кг/кг*моль;

$iStrmEi$ – высота потока, подключенная к входному узлу потока или давления Ei , м;

$iStrmEx$ – высота входящего потока, подключенная к давлению Ex , м.

Если $NPSHA < NPSHR$, имеет место возникновение кавитации. Флаг кавитации насоса устанавливается на True.

В противном случае, если $NPSHA > NPSHR$, жидкость представлена жидкой фазой и в насосе нет проблем с кавитацией, и, следовательно, флаг кавитации установлен на False.

Таким образом, в процессе динамического моделирования поведения насоса, снятые напорные характеристики, мощностные параметры и числовые значения переменных технологического процесса совпадают с паспортными значениями и с данной характеристикой в пределах 3% погрешности в динамических переходных процессах. Статические характеристики показывают полное совпадение с паспортными значениями. Это позволяет говорить о правильной настройке имитационной модели, а также о том, что комплексная имитационная модель сетей электроснабжения, привода и технологического цикла будет давать адекватный результат моделирования.

Технологический участок

В качестве динамической модели технологического цикла (Рисунок 5.5.1), использованы следующие элементы: источник (*source*), клапаны (*XV*); коллекторы;

трубы (*pip*); насосы (*P*); бак (*tank*); сток (*sink*). Каждый из элементов характеризуется своим собственным набором параметров, главные среди которых, это параметры перекачиваемой насосами среды. В источнике находится вода при температуре 24 градуса по Цельсию при атмосферном давлении (101 кПа). Объём коллекторов рассчитан в соответствии с напором и подачей насосов. Пропускная способность (C_V) кранов и труб рассчитаны, исходя из конфигурации насосного оборудования, а также параметров передаваемой жидкости.

Для устойчивой работы насосного оборудования, а также с целью поддержания параметров качества технологического процесса на номинальном уровне, в технологическом контуре развёрнута технологическая система управления, представленная в виде восьми ПИ-регуляторов, настроенных на симметричный оптимум в соответствии (Рисунок 5.5.4).

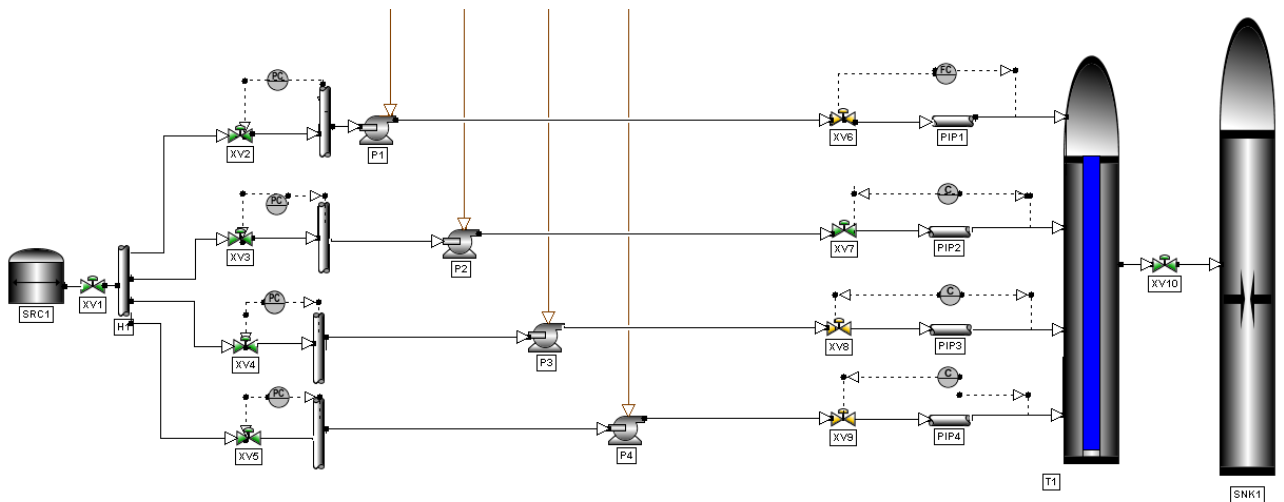


Рисунок 5.5.4 – Имитационная модель технологического цикла

При пуске двигателей большой мощности в сети электроснабжения начинают проходить пусковые токи, а при пуске нескольких таких двигателей уровень токов может соответствовать значениям токов короткого замыкания, что будет вести к ложным срабатываниям релейной защиты и, как следствие, к неселективному действию систем релейной защиты и автоматики (РЗА).

Помимо данной опасности сугубо энергетического характера, имеет место опасность расстройств налаженного и автоматизированного технологического процесса. Так, например, как видно из графиков (Рисунок 5.5.5 - Рисунок 5.5.7), полученных в результате имитационного моделирования, при пуске нескольких

двигателей имел место критический провал напряжения. Данный провал несет в себе риски остановки технологического процесса, а также прецедент повышенной сработки ресурса ЭМО. По сечениям питающих кабелей начинают протекать токи, сопоставимые с токами коротких замыканий. Термическое действие такого уровня тока приведёт к ускоренному старению изоляций обмоток и кабельной продукции. Снижение уровня напряжения также ведёт к изменению механических характеристик асинхронного двигателя по причине квадратичной зависимости момента, развиваемого двигателем от уровня напряжения на зажимах обмотки статора.

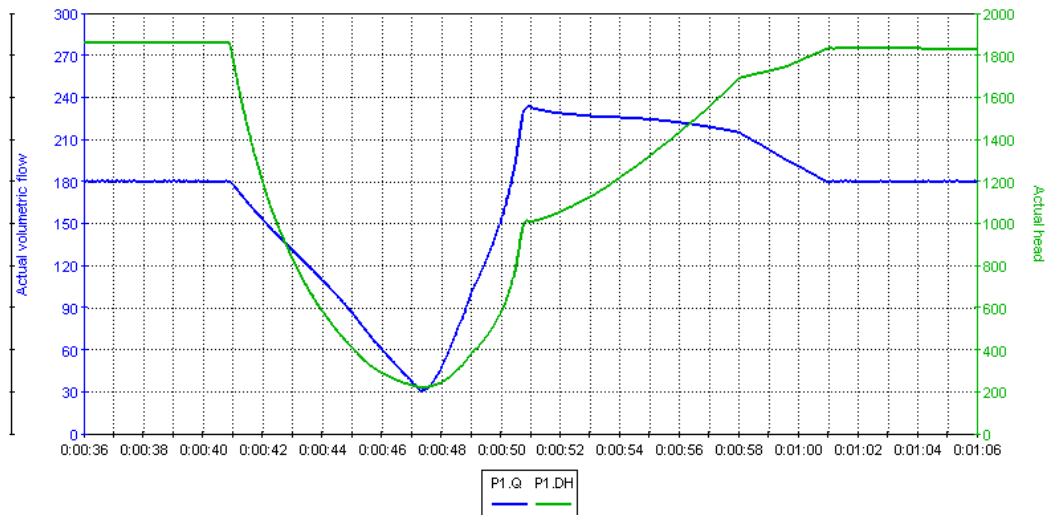


Рисунок 5.5.5 – Изменение параметров технологического процесса при групповом пуске двух двигателей высокой мощности

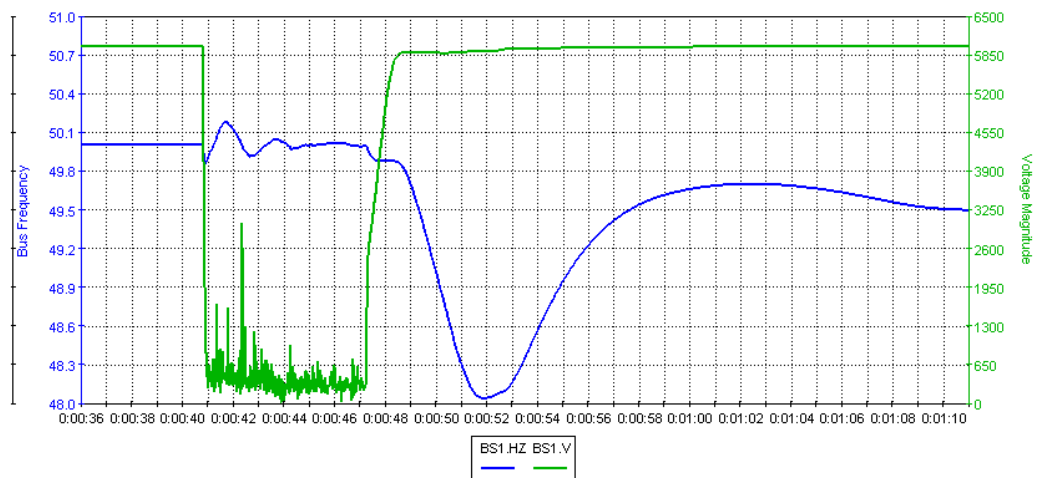


Рисунок 5.5.6 – Параметры качества сети электроснабжения: уровень напряжения и частота на шине BUS1

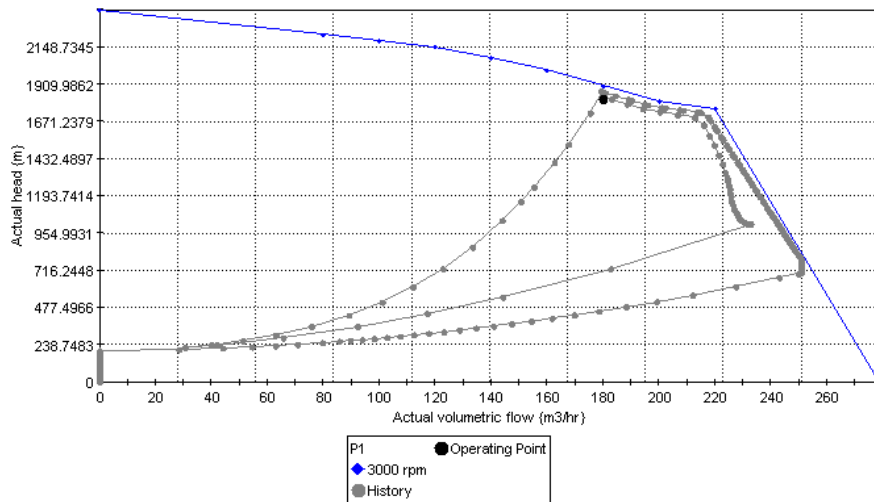


Рисунок 5.5.7 – Рабочая характеристика насоса и его рабочая точка

Насос фактически останавливается (Рисунок 5.5.7), это можно отследить по миграции рабочей точки в левый нижний угол координатной плоскости. Откуда она возвращается далее на напорную характеристику по кривой, лежащей выше пусковой.

Двигатель с пониженным моментом не способен держать имеющуюся нагрузку. Ввиду того, что нагрузка имеет насосный характер, двигатель не опрокидывается, ухудшается лишь момент и связанные технологические переменные. Для насоса и кустовой насосной станции это напор и подача. Технологические регуляторы открывают запорный клапан полностью, чтобы увеличить подачу, но двигатель не справляется с моментом сопротивления, который прикладывается со стороны насоса.

После прохождения переходных процессов в сети электроснабжения параметры качества питающего напряжения восстанавливаются. Однако снижение напора ниже номинального для технологического процесса, рассматриваемого в рамках моделирования, являются критичным нарушением.

Таким образом, приведенный пример показывает возможность динамической модели формировать данные и генерировать параметры, необходимые «цифровому двойнику» для работы интеллектуальных сервисов, ответственных как за анализ энергоэффективности, экологичности и безопасности, так и за прогнозирование рисков развития аварийных событий. Отслеживание данной моделью реальных параметров формирует поле виртуальных датчиков,

способных отображать наличие дефектов, повышения рисков остановки технологического процесса и др.

5.6 Разработка алгоритма управления спросом на электроэнергию ЭМО в ЭТК

С учетом удаленности многих ГиНГП от централизованных СЭС разработан сервис управления спросом на электроэнергию автономного ЭТК содержащего ЭМО с ВИЭ. Потребители, участвующие в управлении спросом ЭлП1 с прерываемым циклом работы (тип 1) и ЭлП2 с непрерываемым циклом работы (тип 2). ЭлП1 имеют возможность прерывания или ограничения цикла работы без участия человека, например, посредством силовых преобразователей, отключающие ЭМО по сигналу от центрального контроллера управления (ЦКУ). В других случаях организуется взаимодействие с пользователем посредством стационарных или мобильных устройств [335] (Рисунок 5.6.1). Потребители регистрируются в системе указывая разновидность потребителя – вентилятор, насос, рефрижератор, освещение и т.п. при этом задаётся разрешённое время выполнения цикла $t_{\text{разр}}$. В системе осуществляется измерение мощности потребителей и генерации [1]. Агрегаторы получают информацию о прогнозировании генерации, потреблении участвующих в программе управления спросом.

В агрегаторе определяется дефицит мощности и прогнозирование индивидуальных графиков потребления ЭлП, при этом определяется работа каких ЭлП, реализующих управление спросом, необходимо корректировать.

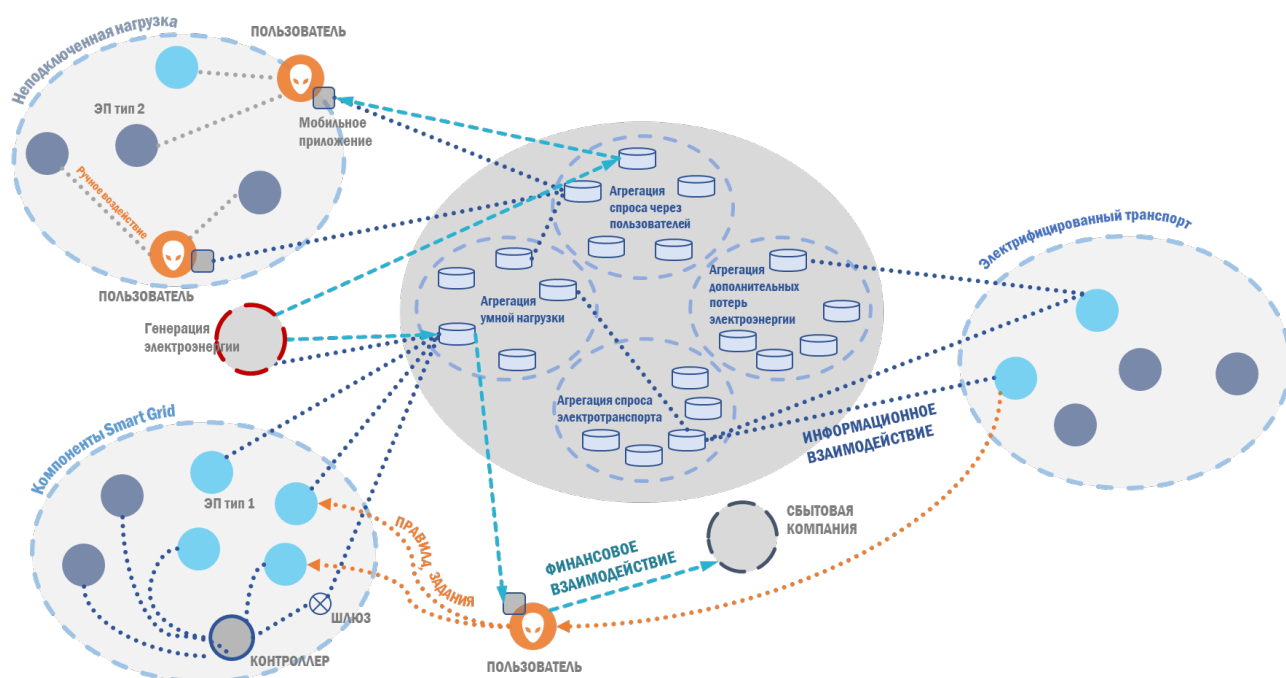


Рисунок 5.6.1 – Архитектура построения сервиса управления спросом в ЭТК.

При выборе рассматривается ЭлП типа 1, у которого в расчётный интервал мощность потребления равна или больше дефицита мощности D , при этом не превышает его более, чем на определённую долю дефицита мощности, при условии, что по результатам оценки вероятности отказа с учетом всех выявленных дефектов ЭлП допускается к работе. Поиск потребителей идет по интервалу значения потребляемой мощности находящейся рядом с снизу к значению дефицита мощности. Корректировка прогнозируемой суммарной мощности, при сокращении суммарного дефицита энергии в пределах горизонта прогнозирования осуществляется на основе дефицита D в расчётный интервал. При положительном дефиците, циклично рассчитывается возможное изменение потребления следующего ЭлП с меньшей мощностью нагрузки в расчётный интервал. Аналогичным образом осуществляется выбор ЭлП2 типа.

Оптимальные интервалы потребления ЭлП определяются на основе генетического алгоритма (ГА). Имитация работы алгоритма для выбора оптимальных интервалов работы ЭлП с помощью ГА проведена на примере автономного ЭТК с ВИЭ золотодобывающего предприятия, содержащего в структуре ветрогенератор мощностью 100 кВт, а также ЭМО.

Графики прогнозируемой мощности потребления и генерации ЭТК (Рисунок 5.6.2).

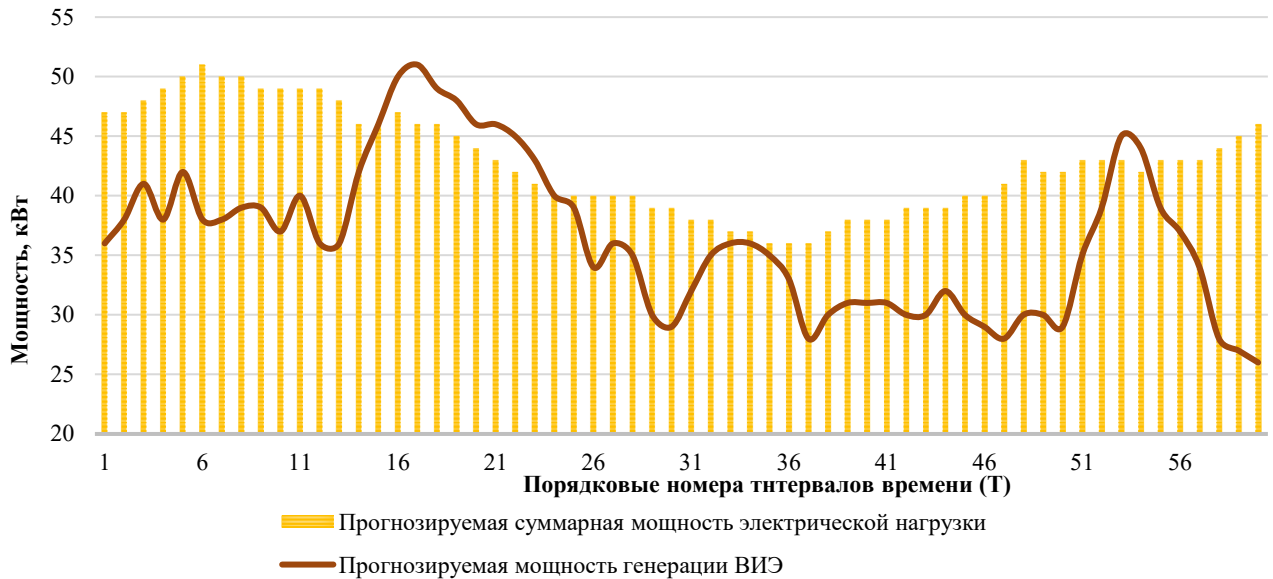


Рисунок 5.6.2 – Прогнозируемые графики мощности потребления и генерации ВИЭ

Рассматриваемый период делится на интервалы времени одной длительности с порядковым номером T (в данном примере $t_{\text{инт.}} = 5$ мин). Также задается количество разрешённых интервалов цикла 60 интервалов ($t_{\text{разр}} = 300$ мин.) и следующий после текущего расчётный интервал.

График мощности выделенного ЭМО с прерываемым циклом представлен на (Рисунок 5.6.3).

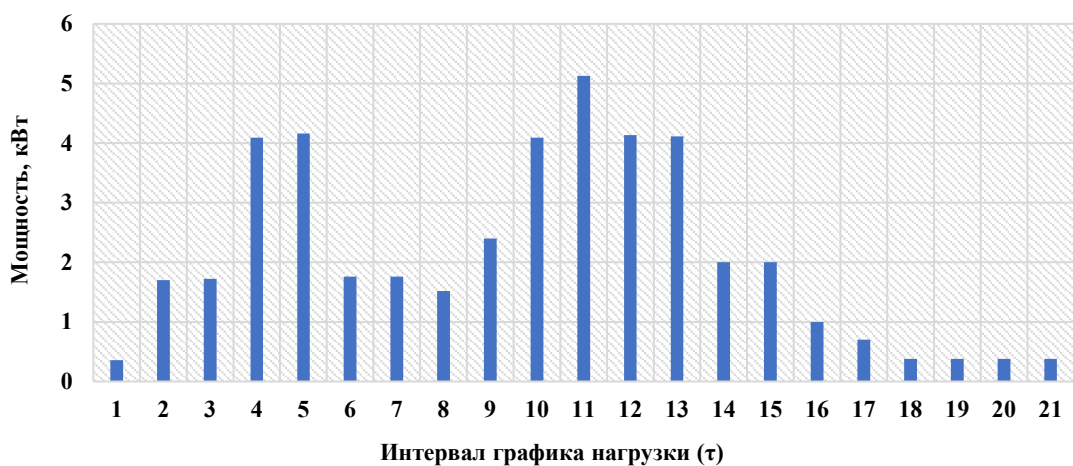


Рисунок 5.6.3 – График мощности выделенного ЭМО

В течение нескольких поколений генетический алгоритм находит индивида с лучшим значением целевой функции, путем формирования случайным образом

поколения, состоящего из x индивидов, представляющих собой вариант работы потребителя в формате T_1, T_2, \dots, T_τ , где T – номер интервала времени, τ – количество интервалов. Для каждого индивида рассчитывается целевая функция, представляющая собой дефицит активной мощности. Из набора лучших индивидов первого поколения, путём комбинирования частей индивидов и изменения значений T формируются x новых индивидов второго поколения. По результатам получаем в последних поколениях множество лучших индивидов с одинаковым значением целевой функции, представляющих собой упорядоченные последовательности интервалов времени:

Индивид 1: [6, 8, 9, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 34, 45, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60]

Индивид 2: [1, 3, 5, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 28, 49, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60].

Таким образом алгоритм находит распределение интервалов работы ЭлП с прерываемым циклом по критерию минимизации дефицита мощности. После этого необходимо сопоставить интервалы графика нагрузки, на которых до распределения интервалов мощность генерации превышала мощность нагрузки. Четвёртый интервал графика нагрузки ($\tau=4$) перенесён на интервал времени $T=16$, пятый интервал ($\tau=5$) на $T=17$. Это задающие интервалы, остальные смещаемые в границах, обозначенных задающими интервалами. После сопоставления упорядочиваем интервалы графика нагрузки, не отнесённые к задающим:

[1, 2, 3, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60],
отнесением их к интервалам с наименьшим прогнозируемым дефицитом:

[3, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 33, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60],
отнесением к интервалам с наибольшим прогнозируемым дефицитом до распределения:

[6, 7, 13, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 47, 48, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60] и т.д.

Прогнозируемый график мощности нагрузки и генерации с учётом распределения примет вид (Рисунок 5.6.4). При распределении мощность нагрузки не использующая ВИЭ составила 62,8 кВт·ч, а без управления спросом 64 кВт·ч.

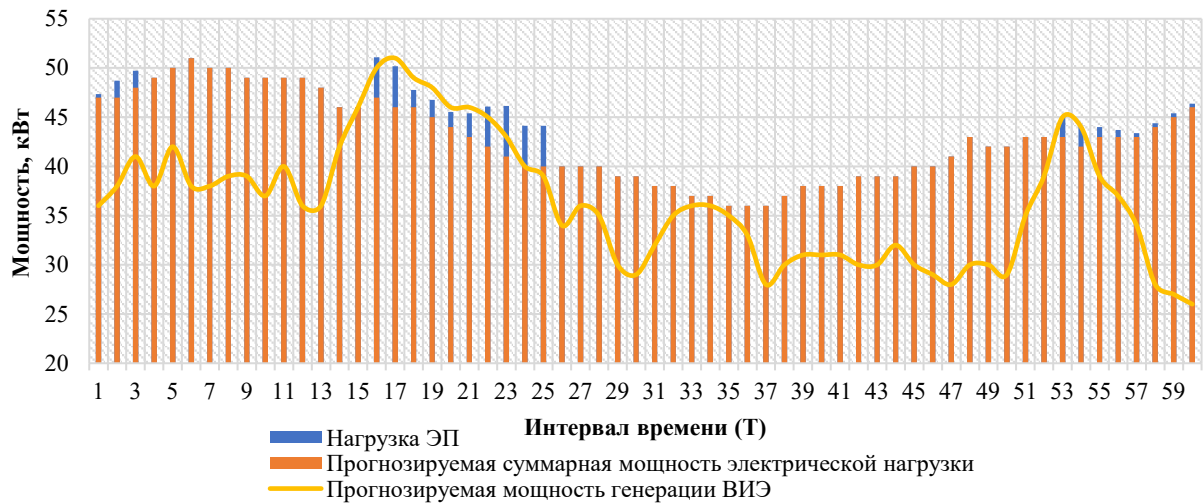


Рисунок 5.6.4 – Прогнозируемый график нагрузки с распределенной мощностью

С учётом того, что в модели ЭМО за цикл работы потребляло 4,2 кВт·ч, количество электроэнергии, вырабатываемое ДЭС, уменьшилось на 1,2 кВт·ч. При потенциале 10% нагрузки, участвующей в управлении спросом потенциал снижения выработки дизельной установкой, составляет 2,7% (25,2 кВт·ч/сут.), что приведёт к снижению потребления дизельного топлива на 6,3 кг/сут. Таким образом, применение алгоритма управления спросом повышает энергоэффективность ЭТК с ЭМО, путём сокращения расхода топлива.

В лаборатории интеллектуальной энергетики Образовательного центра цифровых технологий было произведено физическое моделирование управления ЭМО. Принципиальная схема лабораторного стенда управления спросом (Рисунок 5.6.5).

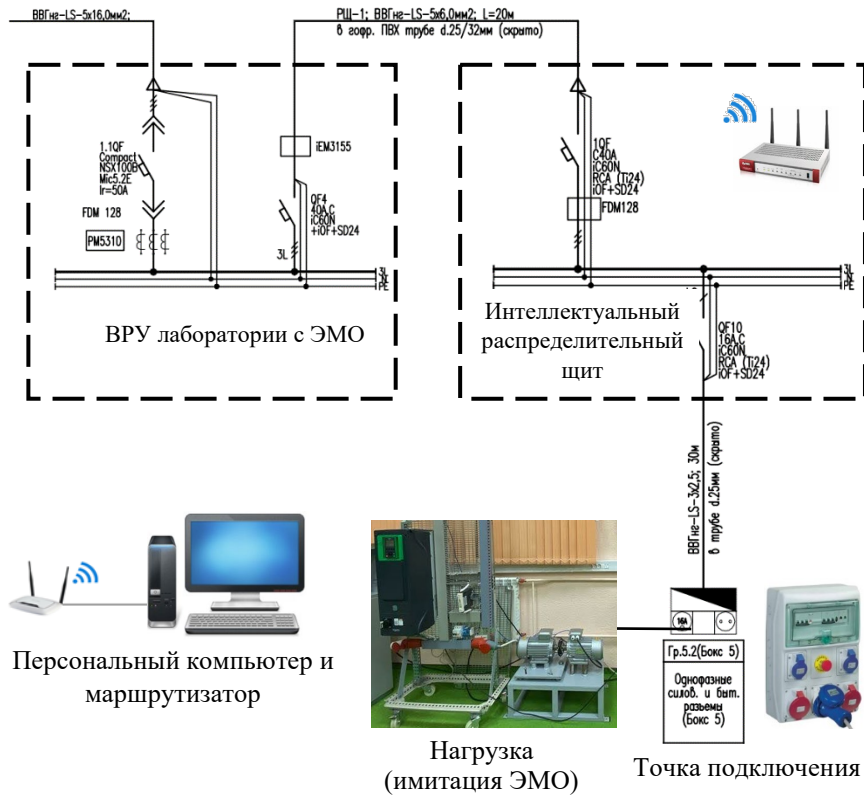


Рисунок 5.6.5 – Принципиальная схема лабораторного стенда управления спросом в ЭТК с ЭМО

Схема информационного взаимодействия представлена на (Рисунок 5.6.6).

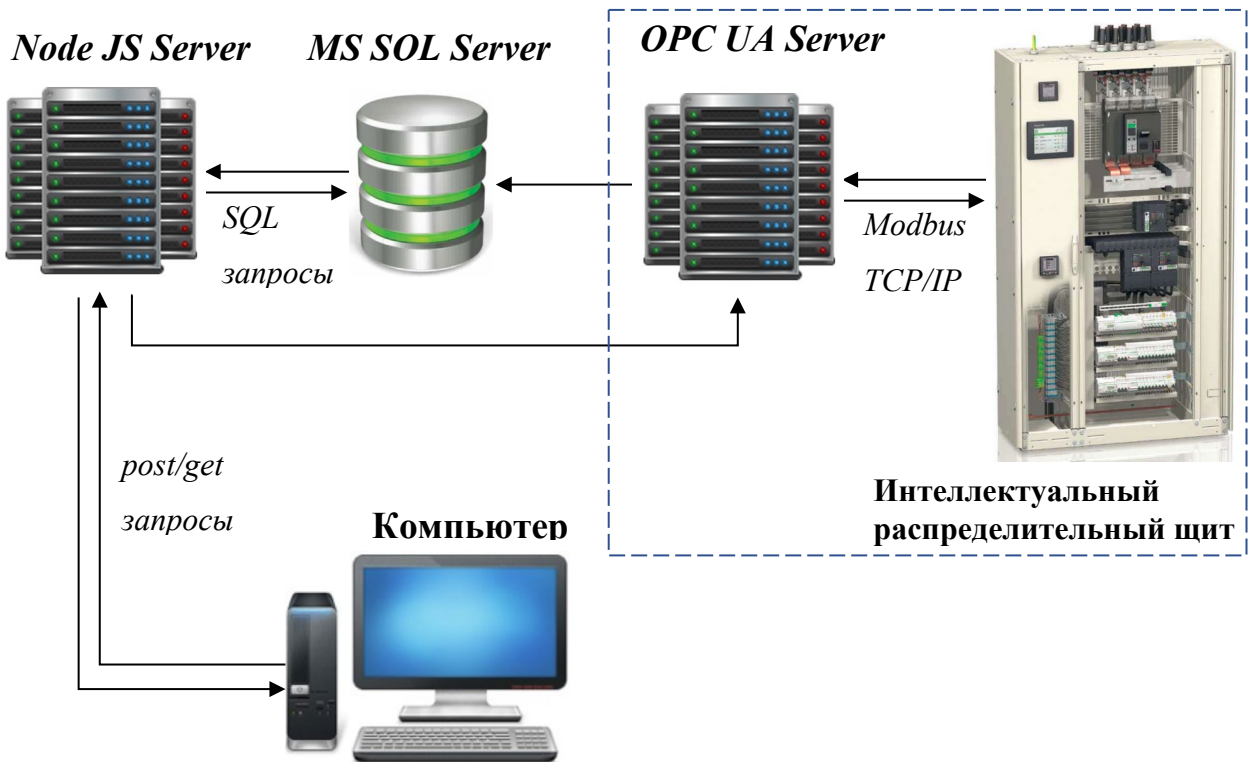
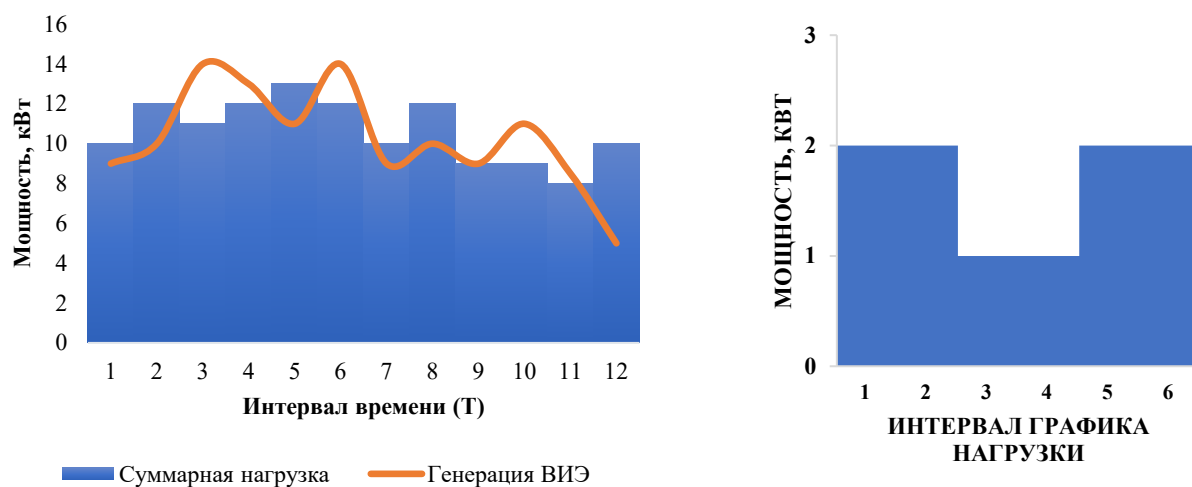


Рисунок 5.6.6 – Информационная структурная схема ЭТК с ЭМО

На сервер (*NodeJS Server*) поступают данные смоделированных графиков нагрузки и генерации (Рисунок 5.6.7 а, Рисунок 5.6.7 б).



а

б

Рисунок 5.6.7 – Смоделированные графики: а – мощности генерации ВИЭ и суммарной мощности электрической нагрузки (без рассматриваемого ЭМО), б – нагрузки ЭМО

Сервер *get* запросом запускает ГА, после поступления информация о запуске нагрузки в программу, написанную на языке *JavaScript* и хранящуюся в *NodeJS Server*, после чего ГА возвращает информацию об распределении интервалов. Работающий *OPC UA* в локальной сети интеллектуального распределительного низковольтного устройства сервер получает от *NodeJS Server* информацию об оптимальных интервалах работы.

При включении ЭМО на интервале времени $T=1$ происходит непродолжительная работа (около 3 с), после чего ЭМО отключается, т.к. ГА находит более оптимальную расстановку интервалов работы устройства: [132, 244, 245, 156]. В этом случае итоговый график мощности (Рисунок 5.6.8).

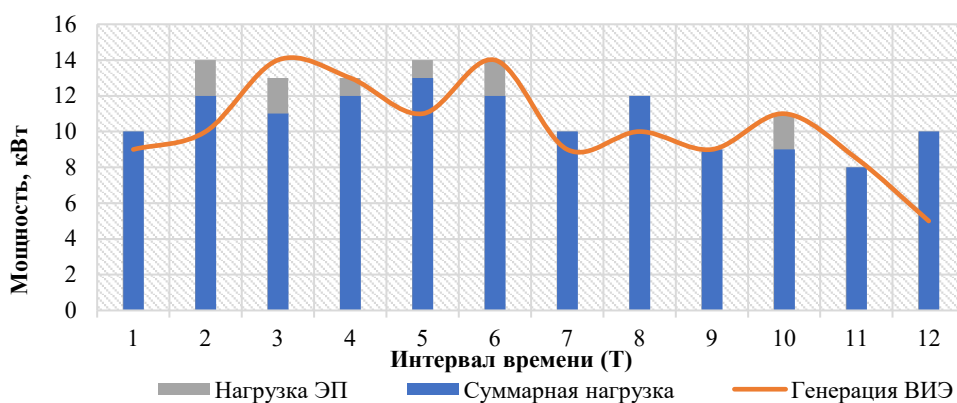


Рисунок 5.6.8 – Итоговый график мощности нагрузки и генерации НВИЭ при работе ГА

При отсутствии системы управления электрической нагрузкой потребление увеличивается на 18,8% относительно найденного варианта. Фактический график нагрузки ЭМО при распределенных интервалах представлен на (Рисунок 5.6.9).

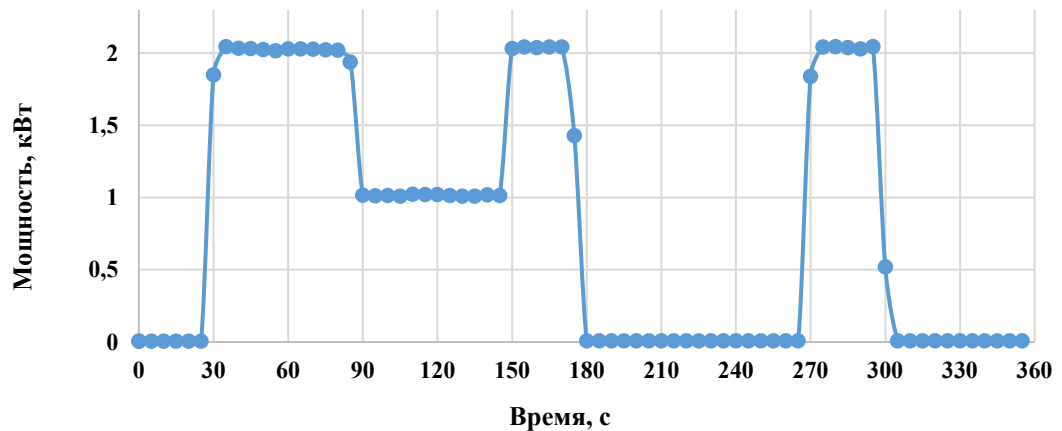


Рисунок 5.6.9 – Фактический график нагрузки ЭМО по результатам распределения интервалов

5.7 Сервисы формирования цифровых моделей

Выполнение вычислительных экспериментов как услуги в форме сервисов проводится с помощью специализированных программ моделирования. Ведущие предприятия ГиНПП, используя средства моделирования, основанные на методах дискретных и конечных элементов, создают цифровые модели, к примеру, работы мельницы при различных условиях всего срока эксплуатации, что позволяет проектировать оптимальные конструкции элементов футеровки, выявлять основные факторы, определяющие свойства изучаемого оборудования, исследовать отклик цифровой модели на вариацию ее параметров и начальных условий. Цифровые модели проще и удобнее использовать, когда реальные эксперименты затруднительны из-за финансовых и физических ограничений. В рамках реализации ЦД работа сервисов моделирования заключается в проведении множества вычислительных экспериментов, целью которых является анализ, интерпретация и сопоставление результатов моделирования, уточнение модели и формирование синтетических данных эталонных или предельных состояний.

В рамках исследования была разработана цифровая модель барабанной мельницы, предоставляющая информацию об изменении положения любой частицы внутри ансамбля частиц мелющей среды и воздействующих на них

контактных сил с учётом размера частиц руды, плотности и свойств измельчаемого материала, размером мельницы, конфигурацией и материалом футеровки барабана, степенью заполнения и скоростью вращения (Рисунок 5.7.1).

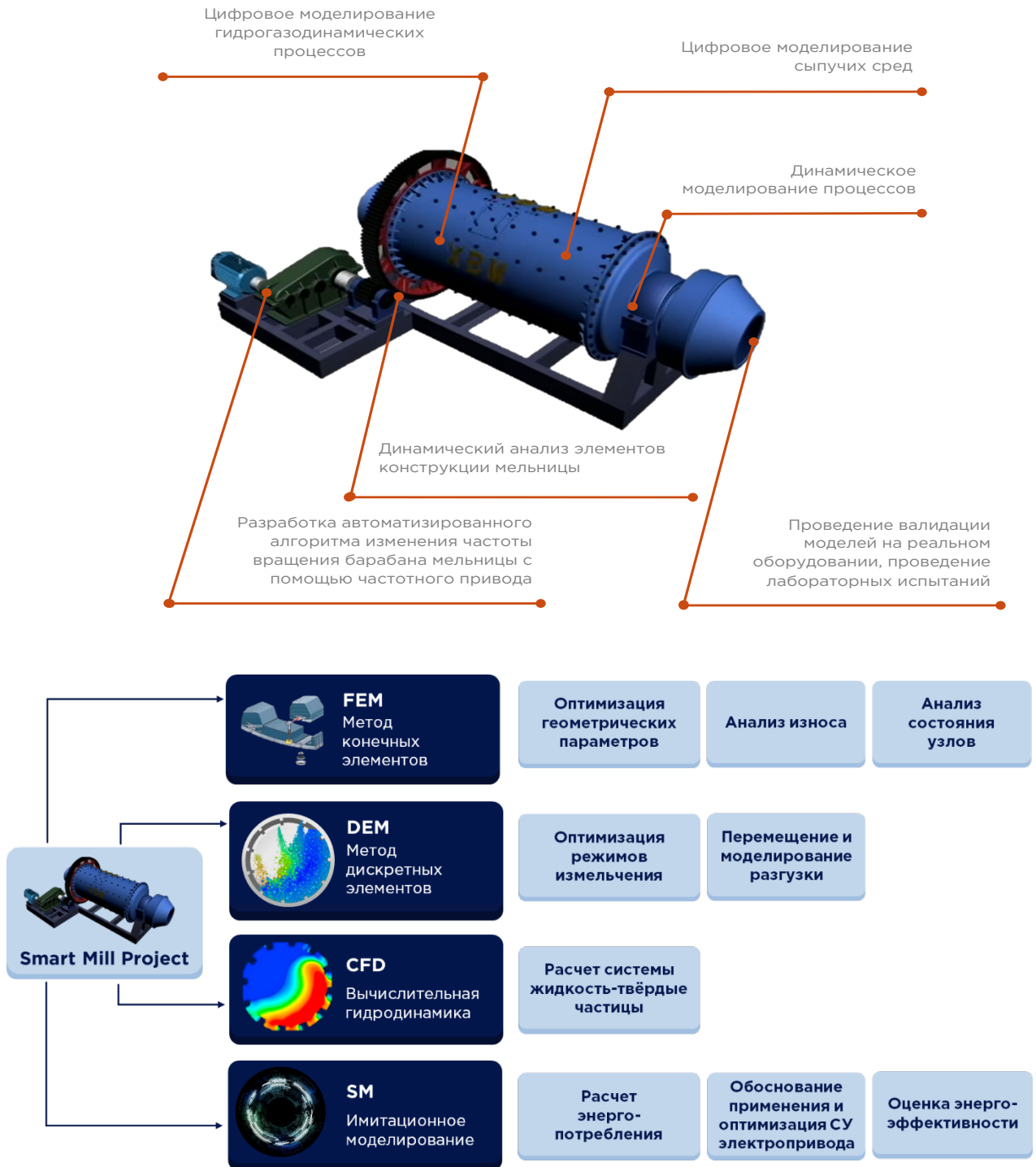


Рисунок 5.7.1 – Схема построения сервиса комплексного компьютерного моделирования ЭМО посредством интеграции программных средств

Результаты моделирования позволяют прогнозировать зависимость энергетических спектров от условий помола. Можно регистрировать положение и скорость поступательного и вращательного движения каждой частицы на каждом шаге моделирования, регистрируются величины нормального усилия и усилия сдвига на контакте, а также энергии, поглощаемой при взаимодействии и др.

ЦД мельницы – это виртуальный прототип реального ЭМО, который позволяет оценить и спрогнозировать рабочие характеристики процесса измельчения и объекта при различных режимах работы, условий окружающей среды и других факторов, а также продемонстрировать изменение технического состояния отдельных узлов и элементов на протяжении жизненного цикла эксплуатации. Данные, полученные из цифрового двойника ЭМО, могут использоваться как для обучения интеллектуальных алгоритмов, так и для расчета предельных состояний. Посредством реализации компьютерного моделирования в виде сервиса и предоставления моделирования как услуги становится возможным реализации гибридных моделей ИИ.

5.8 Архитектура сервиса учета углеродного следа на основе распределенного реестра

Эффективность работы интеллектуальных сетей распределенной генерации должна обеспечиваться агрегированной работой всех их элементов: традиционной энергетики (включая электростанции малой генерации), НВИЭ, накопителей электроэнергии, объектов интеллектуального учета и прогнозирования. Интеграция Интернета вещей (*IoT*) в эту систему позволяет участникам рынка взаимодействовать по принципу «каждый со всеми», чтобы генерация электроэнергии, ее транспорт и потребление были эффективны и выгодны для каждого участника. Блокчейн в данном случае позволяет масштабировать технологию Интернета вещей в децентрализованных интеллектуальных системах и устраняет избыточные узлы, сокращая количество транзакций.

Как показано во второй главе, для ЭМО крайне важно поддержание определенных параметров качества электроэнергии, которое влияет на рост потерь

электроэнергии. С учетом подорожания продукции при введении углеродного налога, ставка которого будет зависеть от объема выбросов парниковых газов при производстве, роль цифровых платформ станет одним из инструментов стратегии устойчивого развития и декарбонизации потребляемой энергии, что потребует расширение исходных данных о генерируемой энергии в области зеленой сертификации, а также учету потерь электроэнергии в том числе и в ЭМО. К учету необходима также не потребленная или перемещенная за счет механизмов управления спросом энергия.

Мультиагентные системные технологии используются для регулирования спроса и предложения, а также отслеживания выбросов, что важно в условиях декарбонизации ГиНГП. С использованием цифровых технологий предприятия смогут продавать избыточную энергию от накопителей или электротранспорта, а также задействовать мобильных потребителей для получения дополнительных «зеленых сертификатов». Блокчейн позволит производствам отслеживать углеродный след электроэнергии через цепочку блоков транзакций.

Основой системы блокчейн является распределенный реестр, в котором электроэнергия используется в качестве базы данных активов. В состав участников (субъектов) системы должны входить производители и потребители электрической энергии. Участники рынка при этом – узлы децентрализованной базы данных, которая на сетевом уровне предоставляет им информацию без централизованной авторизации, практически мгновенно.

Система распределенного реестра представляет собой способ сбора и передачи информации. В ее рамках существует блокчейн – децентрализованная база данных, в которой действия проверяются участниками сети. Использование технологии обладает рядом преимуществ: при использовании технологии блокчейн в виде смарт-контрактов устраняются посредники и упрощается управление распределением электроэнергии; использование криптовалют в пиринговой торговле стимулирует рост децентрализации генерации.

Блокчейн может служить основой сетевых платформ, так как алгоритмы смарт-контрактов выполняют функцию сигналов стоимости, отвечающих за

инициирование транзакций. При необходимости реализации транзакции, механизм которой схематично изображен (Рисунок 5.8.1), появляется новый блок в цепочке – процесс майнинга. Каждый участник блокчейна подтверждает добавление нового блока в цепочку (подтверждая тем самым факт выполнения работы) на основе консенсуса, за что получает вознаграждение. Затем блок добавляется, система обновляется и синхронизируется.

В рамках реализации сервиса ряд устройств готовы осуществлять потребление, его снижение, перенос или производство, на основании чего составляется база тарифов, которая в итоге и формирует сбалансированную цену [1, 332]. Протокольная ставка описывает соотношение спроса и предложения устройства.

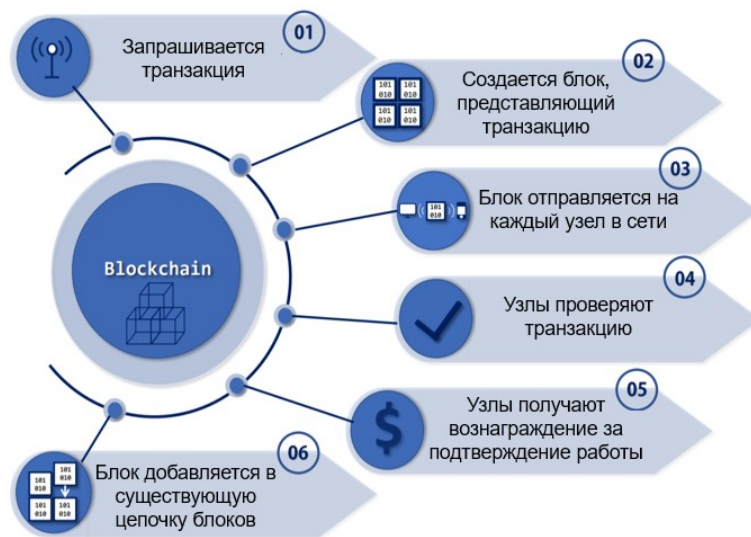


Рисунок 5.8.1 – Концепция проведения peer-to-peer (P2P) транзакций в блокчейн

Агент устройства для каждого случая торгов обновляет свою ставку с упором на его состояние (техническое состояние, значение дополнительных потерь, обусловленных факторами эксплуатации и наличия дефектов, заряд батареи, готовность и объем переноса или снижения потребления). В результате акционер получает всю информацию о соотношении спроса и предложения на рынке с учетом ограничений и не требует наращивания итераций для определения рыночного баланса. Основой технологии является взаимосвязь трех звеньев: агента-акционера, агента-концентратора и агентского устройства.

Основная задача агента-акционера – суммировать ставки, определить баланс кластера и установить цену для каждого агента лично. Основная задача агента-агрегатора – агрегировать все ставки и отправить их агенту-акционеру. Основная задача агентского устройства (аккумулятора, солнечной панели, конвейера, насоса, вентилятора и т.п.) – отправить заявку и получить цену от акционера.

Сервис обеспечивает автономность агента и устройства на основе предварительно установленных экономических настроек, а также позволяет регулировать и отключать их при необходимости.

При создании аналогичной системы на принципе *P2P* торговли электроэнергией может быть разработан смарт-контракт для считывания данных счетчика или цены на электроэнергию в режиме реального времени с определенной периодичностью.

Для аналогичной описанной выше модели предлагаемой платформы будут работать два отдельных алгоритма. Один на стороне агента-акционера, а другой – на стороне агента-агрегатора. При этом агрегаторы, использующие агентов ЭМО, будут определять свои графики нагрузки и объявленный график сброса или переноса нагрузки. Далее каждый агент-агрегатор оптимизирует свои векторы энергетического планирования, в том числе на локальном уровне в соответствии с возможными ограничениями и учётом технического состояния, выявленных дефектов и потерь электроэнергии. Обновленные ими расписания передадутся обратно акционеру. Обмен информацией будет продолжаться до тех пор, пока какой-либо агрегирующий агент не перестанет вносить изменения и не будет достигнуто оптимальное решение для всех. Когда алгоритмы оптимизации в данной модели генерируют план управления энергопотреблением, его можно отправить обратно каждому пользовательскому узлу. Данный двунаправленный информационный поток гарантируется протоколами обмена сообщениями, такими как *Telemetry Message Queuing Telemetry (MQTT)*, которые взаимодействуют с различными интерфейсами прикладного программирования (*API*).

5.9 Разработка сервиса дополненной реальности

Вопрос разработки структуры сервиса дополненной реальности включает в себя выбор основного и вспомогательного оборудования для реализации системы, вопросы интеграции систем дополненной реальности с исследованием применения различных каналов связи для передачи данных, разработки структуры баз данных.

При разработке сервиса системы дополненной реальности следует особое внимание уделить таким важным характеристикам системы, как масштабируемость, модульность, легкая интегрируемость, резервируемость.

Общая структурная схема реализации сервиса дополненной реальности представлена Рисунок 5.9.1.



Рисунок 5.9.1 – Структурная схема реализации сервиса дополненной реальности

Сервис предоставляет доступ к инструкциям по обслуживанию, к историческим данным по работе оборудования, к информации о прогнозируемых дефектах в узлах ЭМО [1, 239, 324]. При получении доступа к инструкциям по обслуживанию оборудования у специалистов благодаря системе дополненной реальности возникает представление текущего шага обслуживания с подробным указанием на обслуживаемую часть оборудования и действий, необходимых к

выполнению. Кроме того, отображается время, выделяемое для проведения данной операции, и следующий и предыдущий шаг по обслуживанию. Наличие ссылок на действующий и предыдущий шаг обязательны, так как специалист может вернуться на шаг назад или спланировать время и действия, необходимые для выполнения следующих операций по обслуживанию электромеханического оборудования.

При выборе режима «Доступ к историческим данным по работе оборудования» перед обслуживающим персоналом возникает информация о значениях различных параметрах электрооборудования в разные моменты времени [1, 239]. Специалист может посмотреть режимные параметры (ток, напряжение и пр.), параметры технологических процессов (производительность технологического комплекса, давления, температура и другие параметры, характеризующие изменение технологического процесса, диагностические параметры). Внешний вид отображаемых данных может быть выбран самостоятельно: в виде всплывающих значений, в виде таблиц, графиков и прочее.

При выборе режима «Получение информации о прогнозируемых дефектах на разных частях машин» перед пользователем выводится следующая информация: остаточный ресурс, прогнозное состояние ЭМО на различные периоды: день, месяц, год и пр. Длительность периода может настраиваться пользователем самостоятельно. Кроме того, выводится информация о рекомендуемых мероприятиях, способных повысить эффективность эксплуатации ЭМО.

Во время проведения обслуживания перед пользователем постоянно появляется информация и статусе обслуживания. Статус меняется в режиме реального времени. Информация о проводимых ремонтах фиксируется в сервисе. Интеграция с голосовым управлением помогает ускорить процессы переключений на разные режимы системы, поиск нужной информации и прочее.

Специальные сервисы системы дополненной реальности взаимодействуют со смежными автоматизированными системами через частное облачное пространство, преимущественно с аналитическим сервером. Такая организация дает ряд преимуществ, основными из которых являются – быстрый доступ к

данным, перераспределение вычислительных мощностей на облачную платформу, обеспечение информационной безопасности и пр.

Одной из самых сложных задач для реализации системы дополненной реальности является правильный выбор специальной метки. В данной сервисе предлагается использовать в качестве маркера совместно *RFID* метку и *GPS* координаты. На первом этапе *RFID* метка позволяет найти комплекс электромеханического оборудования, на втором этапе *GPS* координата позволит выделить нужное оборудование из числа оборудования, входящего в комплекс. Использование *RFID+GPS* позволит осуществить гибкую идентификацию объектов реального мира в виртуальной среде дополненной реальности.

Важным вопросом при разработке структуры системы дополненной реальности является выбор платформы для взаимодействия системы со смежными системами или со вспомогательными устройствами (например, очками или планшетами) [1, 324]. Основными *IoT* платформами, представленными на рынке, являются: *Xively*, *Axeda*, *Thingworx*, *Thing Square*, *Bug Swarm*, *EvryThing*, *Thing Speak* и прочее

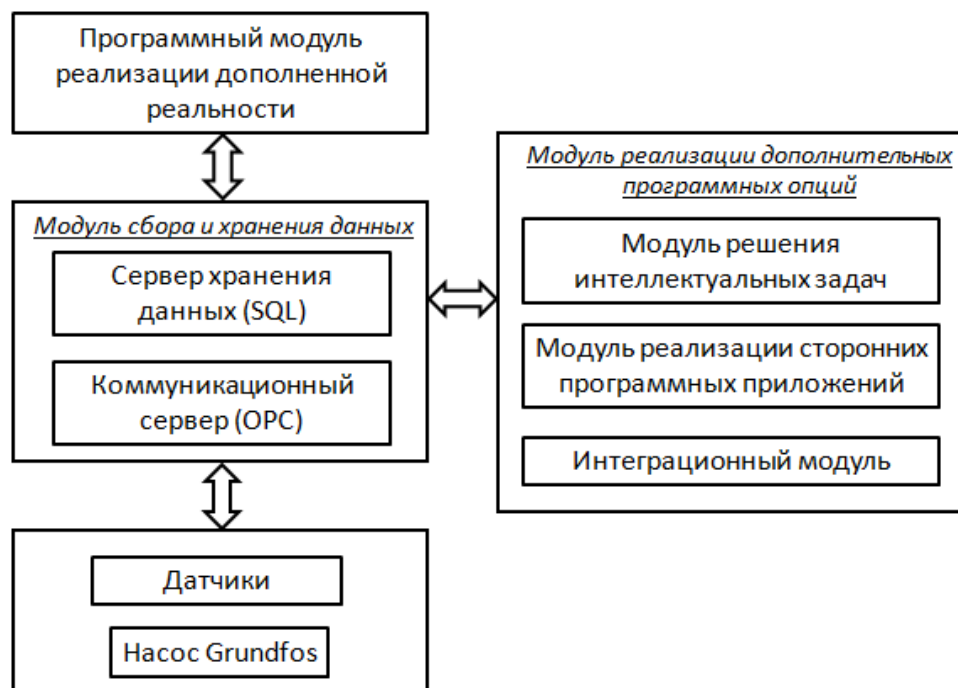


Рисунок 5.9.2 – Схема взаимодействия датчиков экспериментальной установки и модуля дополненной реальности

Для работоспособности приложения необходимо передавать показания датчиков в системе электроснабжения и закрепленных на ЭМО на следующий иерархический уровень – *OPC*-сервер (Рисунок 5.9.3). Данные поступают на сервер, а затем для хранения и архивирования копируются в базу данных *SQL*. Собственно, из базы данных ПО, оснащенное дополненной реальностью, получает информацию о текущем процессе и состоянии оборудования. Тем самым человек, обслуживающий данное оборудование получает актуальную, своевременную, доступную информацию, что позволяет оптимизировать процесс обслуживания. Чтобы не нагружать устройство использованием ПО с большим количеством данных, желательно применять метод маркерного сервиса, при котором параметры процесса загружаются и отображаются на устройстве только после сканирования метки. Таким образом, после сканирования время хранения данных может начинаться от нескольких минут до нескольких часов, чтоб делать приложение гибким в использовании.

Клиентская часть представляет собой мобильное приложение, поддерживающее ОС *iOS* и *Android*. На клиентской части реализованы алгоритмы по реализации технологии дополненной реальности. Кроссплатформенное приложение разработано с помощью ПО *Unity*.

На рисунке 5.9.3 представлена общая сцена системы дополненной реальности, позволяющей проводить техническое обслуживание ЭМО и его составных частей.

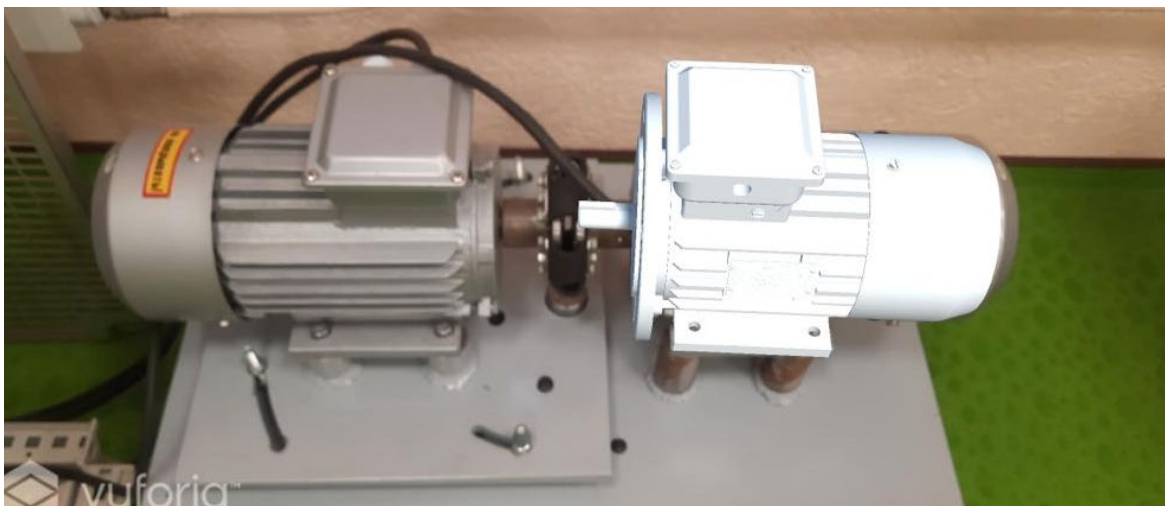


Рисунок 5.9.3 – Общая сцена системы технического обслуживания ЭМО

На рисунке 5.9.4 представлена сцена, показывающая разработку системы дополненной реальности в программном пакете *Vuforia Studio*.

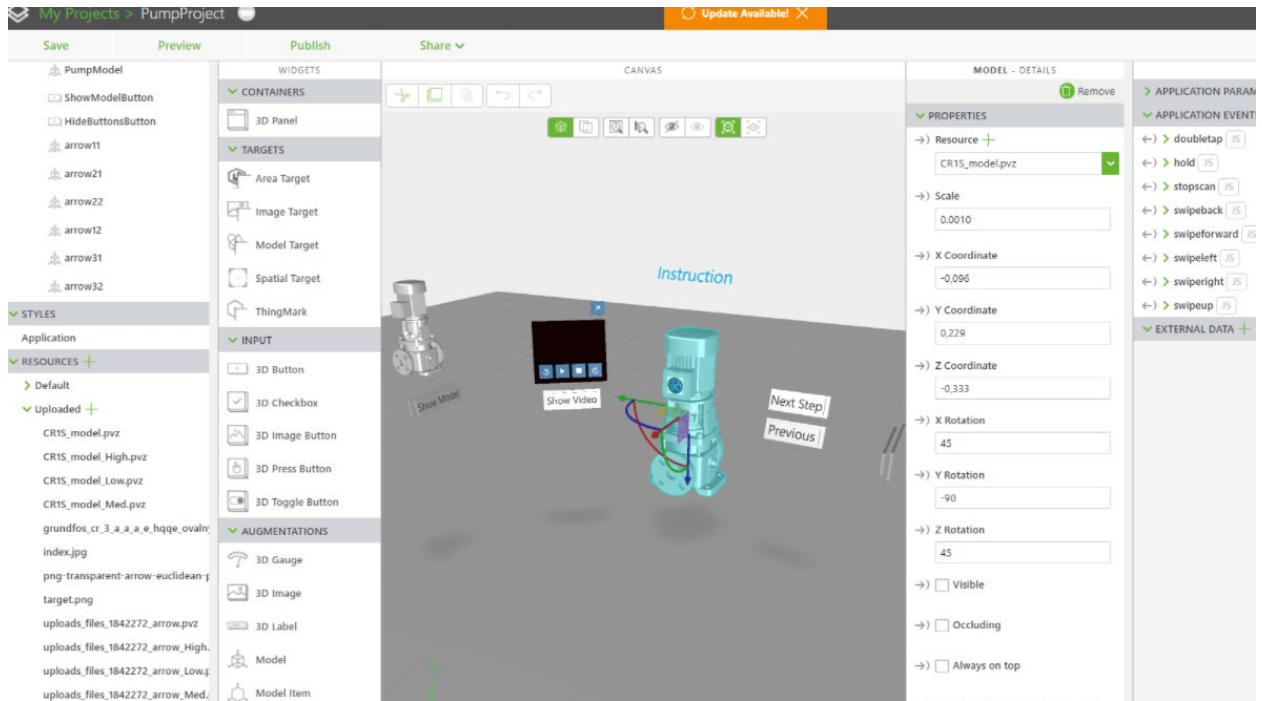


Рисунок 5.9.4 – разработка программного приложения в *Vuforia Studio*

Тестирование сервиса проводилось на четырех группах людей: первая (№1) использовала только инструкцию по эксплуатации, вторая (№2) только рекомендации системы, третья (№3) только помощь эксперта, четвертая (№4) внутренними рекомендациями и связью с экспертом. Для каждой группы по функциям и действиям фиксировалось время выполнения каждой операции. Функция 1 – Демонтаж насоса, функция 2 – Снятие защитного кожуха насоса, функция 3 – Снятие двух частей муфты, функция 4 – Снятие цилиндра, функция 5 – демонтаж моторной секции насоса. Результаты тестирования работы системы представлен в таблице 5.9.1.

На рисунке 5.9.5 показан результат *NASA-TLX* теста. Группа, которая пользовалась только подсказками системы, выполнила задание быстрее, чем группа, которая пользовалась подсказками и помощью эксперта, это вызвано тем, что люди в четвертой группе медленней реагировали на подсказки системы, а наличие возможности обратиться к эксперту расслабляло, что приводило к обращениям к эксперту даже при отсутствии необходимости.

Таблица 5.9.1 – Результаты экспериментов тестирования сервиса дополненной реальности

Номер группы	№1, t сек	№2, t сек	№3, t сек	№4, t сек
Эксперимент 1				
1	178	140	194	131
2	96	37	120	40
3	180	124	170	154
4	94	35	110	25
5	80	80	70	75
Общее время	628	416	664	425
Изменения относительной Группы 1, %	0	-34	+6	-32
Эксперимент 2				
1	194	154	120	147
2	120	40	35	45
3	210	132	142	164
4	90	45	20	30
5	75	74	42	80
Общее время	689	445	359	466
Изменения относительной Группы 1, %	0	-35	-47	-32
Эксперимент 3				
1	210	135	190	175
2	95	55	110	40
3	196	120	170	165
4	87	40	80	35
5	98	62	65	73
Общее время	686	412	615	488
Изменения относительной Группы 1, %	0	-40	-10%	-29
Эксперимент 4				
1	180	152	110	156
2	92	45	30	37
3	214	137	145	152
4	84	38	27	40
5	115	53	45	71
Общее время	685	425	357	456
Изменения относительной Группы 1, %	0	-38	-48	-33
Среднее изменение по всем операциям	0	-37	-25	-32

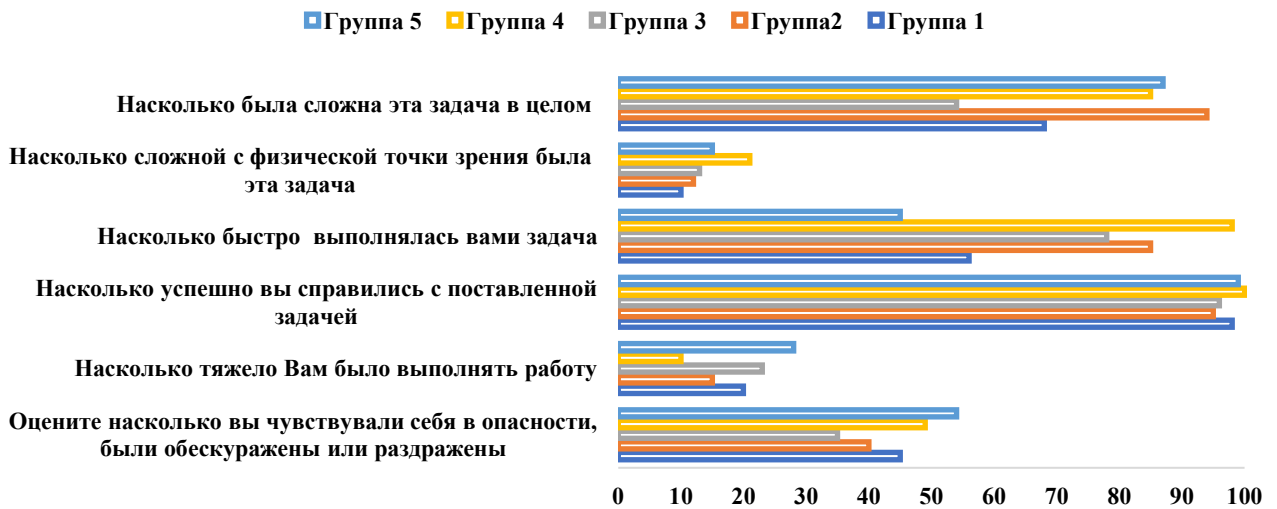


Рисунок 5.9.5 – результат NASA-TLX теста.

Полученные результаты показывают эффективность использования технологии дополненной реальности за счёт существенного сокращения времени на обслуживания одной единицы ЭМО, при условии наличия полного описания всех действий с визуализацией, которые необходимо выполнить при обслуживании. Общее время выполнения операций снизилось на 37% при использовании только системы дополненной реальности и на 32% при использовании комбинации дополненной реальности и удаленной экспертной поддержки.

По результатам проведенного эксперимента система дополненной реальности сокращает время на техническое обслуживание ЭМО. Группа №1, которая обслуживала насос только в соответствии с бумажными инструкциями, обслужила насос быстрее, чем группа, которая пользовалась только помощью эксперта (№3), они потратили 628 и 664 секунды соответственно. Во всех экспериментах группа, которая пользовалась только внутренними подсказками системы (№2), выполнила задачу быстрее группы №4.

5.10 Сервисы обнаружения и восполнения недостающих данных

Глобальная облачная платформа диагностики неисправностей использует данные и знания частных облачных платформ диагностики неисправностей. Эти платформы содержат данные о различных пространствах заводов и фабрик.

Глобальная платформа имеет множество функций. Некоторые из них – функции разгадывания информации, проблема недостаточности. Например, электромеханическое оборудование работает на заводе 2 (Рисунок 5.10.1). Он имеет частную платформу диагностики неисправностей. У этой платформы есть некоторые параметры. В ходе операции был выявлен недостаток данных.

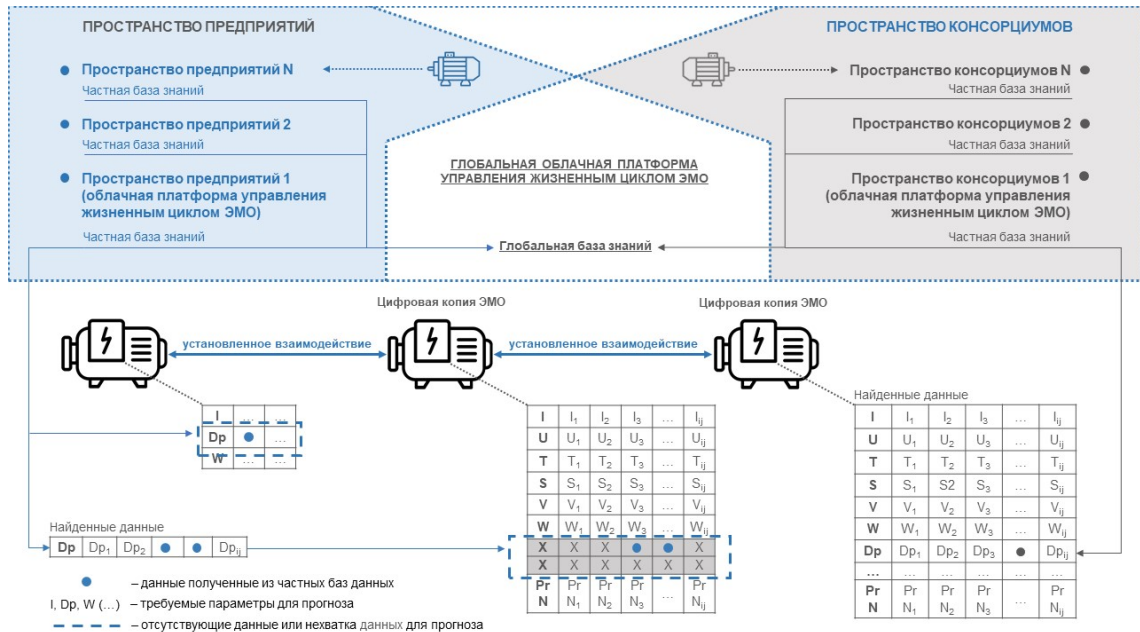


Рисунок 5.10.1 – Структура глобальной облачной платформы диагностики неисправностей

Глобальная облачная платформа помогает решить проблему информационного сбоя следующим образом [326]:

1. Задача идентификации данных решается на уровне частной облачной платформы.
2. В случае, если данные для решения задачи недостаточно соответствуют частной базе знаний.
3. Если информация, содержащаяся в частной базе знаний, недостаточно отражена в глобальной базе знаний.
4. Глобальная база знаний содержит всю информацию об аналогичном электромеханическом оборудовании, полученную в процессе эксплуатации различными заводами, и информацию, полученную производителями этого электромеханического оборудования.
5. Глобальная база знаний ищет частную базу знаний, содержащую информацию о пустых данных.

6. Когда пустые данные находятся в глобальной базе знаний, он передает их в частную базу знаний, которая их запросила.

Таким образом, частная база знаний получает информацию из глобальной базы знаний в виде цифровой копии электромеханического оборудования, с помощью которой она может восстановить недостающие данные или провести другие необходимые анализы и расчеты.

Глобальная платформа диагностики неисправностей соединяет и связывает различные устройства. «Связность» устройств позволит не только глобализировать данные, но и накапливать и использовать знания в виде специальных сервисов «программное обеспечение как услуга» (*SaaS*), что даст быстрый и заметный экономический эффект. Эти услуги, предоставляемые с использованием *IoT*, позволяют улучшить анализ и использование оперативных данных, а также выявить их ценность для различных услуг.

Созданные цифровые копии электромеханического оборудования позволяют устанавливать доверительные соединения для обмена данными с целью формирования полной диагностической картины и прогнозирования состояния, при этом большой объем исторических данных, собранных в течение жизненного цикла оборудования, не исчезает в результате физической утилизации оборудования. Цифровая копия может оставаться в облаке и служить источником недостающей информации для вновь представленного оборудования, поступающего на замену. Система прогнозирования при анализе ищет подходящие объекты с одинаковыми параметрами и условиями или собирает данные из разных цифровых копий для формирования более сложного поля диагностических данных для построения прогнозов с большей точностью и доверительным интервалом. При этом заполнение диагностического поля должно учитывать текущее состояние двигателя.

Результатом моделирования и прогнозирования на основе собранных собственных и извлеченных (найденных) данных с текущего момента и анализа больших массивов исторических данных предыдущих периодов жизненного цикла является разработка информационно-управляющих воздействий, таких как:

ограничение нагрузки с целью продления срока службы; полная остановка с целью восстановления необходимого ресурса или устранения повреждений на ранней стадии; заблаговременная передача задания резервному оборудованию с целью недопущения остановки технологического процесса; заказ деталей с учетом назревающих дефектов; оценка целесообразности вывода на ремонт или техническое обслуживание и т.д.

5.11 Выводы по главе 5

1. Обоснована комплексная взаимосвязанная структура программных модулей (сервисов) диагностики, прогнозирования состояния и оценки уровня энергоэффективности, обнаружения и восполнения недостающих данных работы ЭМО в составе цифрового двойника, ориентированного на безопасное и эффективное управление жизненным циклом эксплуатации ЭМО в структуре ЭТК ГиНГП, позволяющего повысить энергетическую эффективность, снизить стоимость жизненного цикла эксплуатации и эквивалентные выбросы вредных веществ.

2. Обоснована возможность, на примере узла питания нагрузки системы электроснабжения, построения динамической модели поведения ЭМО для использования совместно с интеллектуальными сервисами. По результатам моделирования отклонения напорных и статических характеристик, параметров мощности и числовых значений переменных технологического процесса от паспортных составили не более 3%, что позволяет формировать данные и генерировать параметры, необходимые «цифровому двойнику» для работы алгоритмов ответственных как за анализ энергоэффективности и экологичности, так и за прогнозирование рисков развития аварийных событий на основе динамической модели в составе сервиса.

3. Реализован алгоритм управления спросом на электроэнергию ЭМО с учетом технического состояния на примере автономного ЭТК с НВИЭ, при его реализации достигается сокращение расхода топлива электростанцией за счёт увеличения доли полезно используемой энергии, вырабатываемой

электроустановками на базе НВИЭ. Моделирование работы сервиса было осуществлено для ЭМО с электропотреблением за цикл работы 4,2 кВт·ч, при этом количество электроэнергии, вырабатываемой ДЭС, уменьшилось на 1,2 кВт·ч, что составляет 2,7%.

4. Доказана эффективность применения средств дополненной реальности в составе сервиса для повышения безопасности и скорости обслуживания оборудования и построения взаимодействия человека с цифровым двойником. В ходе эксперимента по наиболее важным функциям и действиям для каждой исследуемой группы фиксировалось время выполнения по 5 операциям технического обслуживания ЭМО. При применении системы визуализации существенно сокращается время выполнения операций, так общее время выполнения обслуживания снизилось на 37% при использовании только системы дополненной реальности и на 32% при использовании комбинации дополненной реальности и удаленной экспертной поддержки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе лично автором на основе системного подхода и выполненных научно-практических законченных исследований с получением новых теоретических положений решена актуальная научная проблема обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации ЭМО в структуре ЭТК на основе комплексного применения цифровых технологий, что вносит значительный вклад в развитие ГиНГП.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Выявлены закономерности изменения показателей эффективности работы электромеханического оборудования от вида и степени повреждения, установлено влияние роста потерь электрической энергии на сокращение срока службы электромеханического оборудования в составе электротехнических комплексов ГиНГП. Эксплуатация электротехнических комплексов в тяжелых условиях (климатические, нестационарные и перегрузочные режимы работы, специфика добычи, транспортировки и переработки углеводородов) сопряжена с ускоренным износом и внеплановым выходом из строя ЭМО. На основе анализа отказов ЭМО на ГиНГП и статистики их возникновения установлено, что наибольшее количество отказов возникает по причине дефектов подшипника до 41% и статора до 37%, основными причинами отказов являются некачественное ТОиР до 34% и заводской брак до 20% от общего числа отказов, при этом основными факторами воздействия приводящими к отказам являются неисправное охлаждение и перегрев по причине внутренних дефектов и старения – до 26%, влияние системы электроснабжения – до 20% и окружающая среда до 13%. Установлено, что факторы снижения срока службы и наработки на отказ ЭМО, а также рост потерь электроэнергии и повышенной вибрации в ЭМО оказывают влияние на эффективность и безопасность функционирования ЭТК ГиНГП.

2. Разработана методология выполнения диагностики и оценки остаточного ресурса без остановки и вывода из эксплуатации ЭМО на основе многофакторного анализа его эксплуатационных электрических параметров. В качестве показателя технического состояния используется коэффициент изменения потерь в элементах

ЭТК, равный разнице относительных потребляемых ЭМО мощностей при определенной величине нагрузки, а также приведенная величина потерь в агрегате за время до перехода его в предельное состояние, в котором дальнейшая эксплуатация ЭМО невозможна.

3. Предложены комплексные диагностические признаки, позволяющие отслеживать и прогнозировать динамику изменения остаточного ресурса ЭМО при различных параметрах, переменных режимах работы и флуктуации внешних и эксплуатационных факторов ЭТК ГиНГП. Интеграция информации об эталонных состояниях, а также предложенных диагностических признаков, извлекаемых из электрических сигналов без остановки технологического процесса, позволяет существенно повысить эффективность диагностики ЭМО.

4. Разработан комплекс алгоритмов обработки эксплуатационных данных и диагностических признаков на основе средств искусственного интеллекта для определения повреждения и классификации режимов работы ЭМО в ЭТК, позволяющий перейти к предсказательной системе технического обслуживания и ремонта для повышения безопасности и эффективности эксплуатации ЭМО.

5. Обоснована структура и методология функционирования цифрового двойника процесса управления техническими воздействиями на жизненном цикле эксплуатации ЭМО в составе ЭТК ГиНГП, отличающаяся учетом дополнительных потерь электроэнергии и воздействия на окружающую среду, обусловленных наличием дефектов ЭМО. Определены критерии управления, параметры мониторинга и математические модели, необходимые для учёта взаимного влияния фактического состояния и энергетических потоков структурных элементов систем энергообеспечения и энергопотребления с учётом сценарных условий функционирования и развития ЭТК ГиНГП.

6. Обоснована комплексная взаимосвязанная структура программных модулей и разработаны алгоритмы их функционирования в составе распределенной системы управления жизненным циклом эксплуатации ЭМО с учетом классификации первичной информации, ранжирования сценариев обмена данными, уровня тяжести последствий аварий и цифровизации ЭТК ГиНГП.

7. Предложены технические решения и алгоритмы, повышающее достоверность выявления дефектов, что повышает эффективность процедуры технической диагностики применительно к электромеханическому оборудованию.

8. Разработано алгоритмическое и программное обеспечение для выявления дефектов, предназначенное для электромеханического оборудования ЭТК ГиНПП, с учетом специфики процессов в них происходящих.

9. Разработана методика выбора структуры и архитектуры алгоритмов, применяемых для извлечения диагностической информации и прогнозирования развития дефектов в системе управления жизненным циклом эксплуатации ЭМО.

10. Разработаны архитектуры построения цифровых двойников для интеграции в интеллектуальные ЭТК с целью управления энергоэффективностью и экологичностью на протяжении жизненного цикла эксплуатации ЭМО.

Разработанные в диссертации методы и алгоритмы применяются в производственную деятельность ООО «АВТОТЕХИНМАШ» при сервисном обслуживании и ремонте карьерной, шахтной и специальной техники для определения потерь и эквивалента вредных выбросов, обусловленных техническим состоянием электромеханического оборудования, что позволит снизить суммарные затраты на потери электроэнергии до 10% усредненно на всем сроке эксплуатации техники. При построении цифровых моделей СЗФО АО «МЦД» применен алгоритм для определения дефектов мельниц, что в результате позволяет снизить число аварийных остановок оборудования и увеличить производительность. Методика оценки остаточного ресурса по электрическим параметрам на основе анализа коэффициента изменения потерь применена ООО «НПП «КИТ» при создании алгоритмов работы микропроцессорных устройств релейной защиты в электротехнических комплексах, имеющих в своем составе электропривод, построенный на основе двигателей переменного тока. Результаты использовались при ведении проектной и экспертной работы в деятельности АО «Гипроцветмет», а также в ООО «Севзаптехника» принят к использованию алгоритм нейросетевого диагностирования неисправностей и оценки технического состояния для повышения безопасности эксплуатации автономных дизель-генераторных

электростанций, обеспечивающих энергоснабжение электротехнических комплексов нефтегазовых предприятий. Метод оценки взаимного влияния фактического состояния и энергетических потоков структурных элементов электротехнического комплекса, учитывающего сценарные условия их функционирования, использован АО «Готэк Северо-Запад» при оценке рисков безопасной эксплуатации электромеханического оборудования с учетом сценарных условий в зависимости от вероятности возникновения дефектов и уровня потерь электроэнергии в процессе эксплуатации, обусловленных его техническим состоянием.

В работе выделен ряд аспектов для развития темы и проведения дополнительных исследований, включая развитие алгоритмов выявления причин появления дефектов и отказов на основе интеграции информационных потоков, развитие алгоритмов технического зрения и синтезирование речи для реализации когнитивных помощников при техническом обслуживании и ремонте ЭМО. Перспективным представляется интеграция системы управления эксплуатацией ЭМО с прогностическими алгоритмами управления оборудованием и алгоритмами управления интеллектуальными ЭТК предприятий.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АД	–	Асинхронный двигатель
АДКЗР	–	Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором
АДФР	–	Асинхронный двигатель с фазным ротором
АСПО	–	Асфальтосмолопарафиновые отложения
АЦП	–	Аналогово-цифровой преобразователь
АЭП	–	Автоматизированного электропривода
БД	–	База данных
БДПТ	–	Бесколлекторный двигатель постоянного тока
БПФ	–	Быстрое преобразование Фурье
ВБП	–	Верхней боковой полосой
ВГС	–	Высшие гармонические составляющие
ВРД	–	Вентильный реактивный двигатель
ГА	–	Генетический алгоритм
ГиНГП	–	Горных и нефтегазовых предприятий
ГММО	–	Гибридных моделей машинного обучения
ДЭС	–	Дизельные электростанции
ЕЭС	–	Единой энергетической системе
ИИ	–	Искусственный интеллект
ИМ	–	Исполнительный механизм
ИНС	–	Искусственная нейронная сеть
КЗ	–	Короткое замыкание
КДПТ	–	Коллекторный двигатель постоянного тока
КПГ	–	Компримированный природный газ
КПД	–	Коэффициент полезного действия
КСС	–	Количество сломанных стержней
КТП	–	Комплектные трансформаторные подстанции
КТППН	–	Комплектные трансформаторные подстанции для погружных электронасосов
МГЭИК	–	Межправительственной группы экспертов по изменению климата
МДС	–	Магнитодвижущая сила
МДЭ	–	Методом дискретных элементов
МП	–	Механический преобразователь энергии
МСК	–	Минерально-сырьевой комплекс
НБП	–	Нижняя боковая полоса
НКТ	-	Насосно-компрессорные трубы
НН	–	Нелинейная нагрузка
НВИЭ	–	Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии
ОСР	–	Обрыва стержней ротора
ОЭС	–	Объединённая энергетическая система
ПЗУ	–	Постоянном запоминающем устройстве
ПНГ	–	Попутный нефтяной газ
ПО	–	Программное обеспечение

ППД	–	Поддержание пластового давления
ПЭД	–	Погружные электродвигатели
ПСТОиР	–	Предсказательная система технического обслуживания и ремонта
ПЧ	–	Преобразователь частоты
РЗиА	–	Релейная защита и автоматика
СД	–	Синхронный двигатель
СДОВ	–	Синхронный двигатель с постоянными магнитами
СДПМВ	–	Синхронный двигатель с питанием от магнитов
СДПМП	–	Синхронный двигатель с поверхностной установкой постоянных магнитов
СЖЦЭ	–	Стоимости жизненного цикла эксплуатации
СКЗ	–	Среднеквадратическое значение
СКН	–	Станков-качалок
СПГ	–	Сжиженный природный газ
СМП	–	Северный морской путь
СРД	–	Синхронный реактивный двигатель
СУ	–	Система управления
СУБД	–	Система управления базами данных
СШХ	–	Северный широтный ход
СЭС	–	Системы электроснабжения
ТКО	–	Твердые коммунальные отходы
ТОиР	–	Техническое обслуживание и ремонт
ТС	–	Техническое состояние
ТЭК	–	Топливо-энергетический комплекс
УПЕК	–	Установка поперечной компенсации
УСШН	–	Установка скважинного штангового насоса
УЭЦН	–	Установка электроцентробежного насоса
ЦД	–	Цифровой двойник
ЦИЭ	–	Цифровая интеллектуальная энергетика
ЦКУ	–	Центрального контроллера управления
ЧРП	–	Частотно-регулируемым приводом
ШГН	–	Штанговые глубинные насосы
ЭВМ	–	Электронная вычислительная машина
ЭГПА	–	Электроприводные газоперекачивающие агрегаты
ЭД	–	Электродвигатель
ЭДС	–	Электродвижущая сила
ЭлП	–	Электроприемники
ЭМП	–	Электромеханический преобразователь
ЭММ	–	Электромагнитный момент
ЭМО	–	Электромеханическое оборудование
ЭП	–	Преобразователь электрической энергии
ЭТК	–	Электротехнические комплексы
ЭЦН	–	Электроцентробежный насос
ANN	–	Artificial neural network (<i>искусственная нейронная сеть</i>)

ARIMA	–	Autoregressive integrated moving average (<i>авторегрессия интегрированного скользящего среднего</i>)
ARMA	–	Autoregressive-moving-average (<i>авторегрессия скользящего среднего</i>)
CNN	–	Convolutional neural network (<i>сверточная нейронная сеть</i>)
CMMS	–	Computerized Maintenance Management System (<i>автоматизированные системы управления ТОиР</i>)
DNN	–	Deconvolutional Neural Networks (<i>глубокая нейронная сеть</i>)
DT	–	Digital technologies (<i>цифровые технологии</i>)
EAM	–	Enterprise Asset Management (<i>управление активами предприятия</i>)
EMD	–	Empirical Mode Decomposition (<i>эмпирическая модовая декомпозиция</i>)
ERP	–	Enterprise Resource Planning (<i>планирование ресурсов предприятия</i>)
IIoT	–	Industrial Internet of Things (<i>промышленный интернет вещей</i>)
IoT	–	Internet of Things (<i>интернет вещей</i>)
FDFM	–	Frequency-division multiple access (<i>множественный доступ с разделением частот с одной несущей</i>)
FFT	–	Fast Fourier transform (<i>быстрое преобразование Фурье</i>)
HHT	–	Hilbert–Huang transform (<i>преобразование Гильберта-Хуанга</i>)
LCA	–	Life – cycle assessment (<i>оценка жизненного цикла</i>)
LSTM	–	Long short-term memory (<i>долговременная кратковременная память</i>)
KNN	–	k-Nearest Neighbor (<i>метод k-ближайших соседей</i>)
LCC	–	Life-Cycle Costing (<i>Стоимость жизненного цикла</i>)
MES	–	Manufacturing execution system (<i>исполнительные системы производства</i>)
MLP	–	Multilayered perceptron
RCM	–	Reliability Centered Maintenance (<i>программа обслуживания для обеспечения надежности оборудования</i>)
SSA	–	Singular spectrum analysis (<i>спектральный сингулярный анализ</i>)
SaaS	–	Software-as-a service (<i>программное обеспечение как сервис</i>)
SG	–	Smart Grid (<i>умные сети электроснабжения</i>)
SMA	–	Simple Moving Average (<i>простое скользящее среднее</i>)
SoS	–	System of Systems (<i>система систем</i>)
SVD	–	Singular value decomposition (<i>сингулярное разложение</i>)
SVM	–	Support vector machine (<i>метод опорных векторов</i>)

VMD	—	Variational mode decomposition (<i>вариационная модовая декомпозиция</i>)
WT	—	Wavelet transform (<i>вейвлет-преобразование</i>)
XaaS	—	X-as-a-Services (<i>все как услуга</i>)
$B(\theta, t)$	—	магнитная индукция в зазоре, Гн
μ_0	—	магнитная постоянная, Гн/м
A	—	векторный потенциал, $\frac{\text{В}\cdot\text{с}}{\text{Кл}}$
$\delta(\theta, t)$	—	величина воздушного зазора, м
$F(\theta, t)$	—	магнитодвижущая сила (МДС), А · виток
$\Lambda(\theta, t)$	—	магнитная проводимость, Вб · А
$I_{m,k}$	—	амплитуда k -той гармоники тока, А
ω	—	угловая скорость вращения поля статора, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$
φ_1	—	угол сдвига по фазе между током и напряжением, рад
$M_{m,k}$	—	момент, создаваемый соответствующей гармоникой тока
$F(\theta, t)$	—	пространственные гармоники МДС
$F_s(\theta, t)$	—	МДС статора
ν	—	порядок пространственных гармоник
$\hat{F}_{s,\nu}$	—	амплитуда зубовых гармоник МДС
q	—	число параллельных ветвей обмотки
W	—	число проводников в пазе
$k_{d\nu}$	—	коэффициент распределения обмотки для ν -ой гармоники
$k_{p\nu}$	—	коэффициент скоса пазов для ν -ой гармоники
I_1	—	первая гармоника тока статора, А
Q_s	—	число пазов статора
μ_1	—	порядок пространственных гармоник
$\omega_{\mu,1}$	—	частота и фаза μ -й гармоники, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$;
ϑ_μ	—	фаза μ -й гармоники рад
$\hat{F}_{r,\mu}$	—	амплитуда зубовых гармоник МДС
ξ_1, ξ_μ	—	обмоточные коэффициенты ротора для основной и μ -ой гармоники
s	—	скольжение
f_1	—	частота источника питания
p	—	число пар полюсов двигателя
p_{sCu}	—	потери в меди статора
T	—	период тока статора
n	—	число периодов тока статора
R_p	—	сопротивление фазы статора
i_A, i_B, i_C	—	токи фаз А, В и С
p_{rCu1}	—	суммарные потери в стержнях ротора
Z_2	—	число стержней ротора
I_{ej}	—	среднеквадратичное значение тока j -го концевой кольца
R_{ej}	—	сопротивление j -го концевой кольца
p_{Fek}	—	потери в сердечнике на единицу объема k -го прибора
p_{hk}	—	гистерезисные потери, на единицу объема k -го прибора
p_{ck}	—	классические потери на единицу объема k -го прибора

p_{ek}	—	избыточные потери на единицу объема k -го прибора соответственно
k_h, k_c, k_e	—	коэффициенты гистерезисных потерь, классических потерь и избыточных потерь
f_k	—	частота магнитной индукции
B_{kmax}	—	амплитуды индукции потока по длинной оси регулярного эллиптического вращающегося магнитного поля
B_{kmin}	—	— амплитуды индукции потока короткой оси регулярного эллиптического вращающегося магнитного поля
l_{Fe}	—	эффективная длина железного сердечника
S_k	—	площадь k -го блока сердечника
p_m	—	механические потери
D_1	—	внешний диаметр статора
p_{ad}	—	дополнительные потери
P_2	—	механическая мощность
P_1	—	электрическая мощность
η	—	коэффициент полезного действия
E	—	ЭДС
$\cos \varphi$	—	коэффициент мощности
L	—	единица времени срока службы
B	—	постоянный коэффициент, определяемый экспериментально
φ	—	энергия активации, эВ
T	—	абсолютная температура, К
k	—	$0,8617 \cdot 10^{-4}$, эВ/К, постоянная Больцмана
L_x	—	расчетный срок службы при температуре
L_0	—	контрольный срок службы при номинальной нагрузке
T_b	—	общая допустимая температура для класса изоляции
T_x	—	температура горячей точки для класса изоляции
A	—	теплоотдача двигателя, Дж/град*с
e	—	основание натуральных логарифмов ($e = 2,718$)
C	—	теплоемкость двигателя, Дж/град
τ_0	—	начальное превышение температуры двигателя
U_p	—	амплитуда основного переменного напряжения
f_c	—	основная частота
f_m	—	частота модуляции
ΔU	—	изменение величины напряжения
m	—	глубина модуляции
K_Γ	—	коэффициент гармоник
δU_y	—	отклонение установившегося напряжения
K_{2U_i}	—	коэффициент несимметрии напряжений
$U_{1(1)i}$	—	действующее значение напряжения прямой последовательности
K_{0U_i}	—	коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности
f_y	—	отклонение частоты
I_{1m}	—	амплитуда составляющих тока прямой последовательностей
I_{2m}	—	амплитуда составляющих тока обратной последовательностей
i_{1i}	—	симметричные составляющие токов прямой последовательности

i_{2i}	—	симметричные составляющие токов обратной последовательности
P_{i-1}	—	мощность на выходе преобразователя, Вт
P_i	—	мощность на входе блока, Вт
η_i	—	коэффициент полезного действия преобразователя
ΔP_i	—	величина потерь в преобразователе, Вт
$P_{1 \text{ нач}}$	—	начальное значение потребляемой мощности привода при нагрузке P_2 , измеренное на технически исправном двигателе в начальный период его эксплуатации, кВт
$P_{1 \text{ тек}}$	—	текущее значение потребляемой мощности двигателя при нагрузке P_2 , измеренное в процессе его эксплуатации, кВт
T_d	—	время смены, ч
$P_{1 \text{ ном}}$	—	номинальное значение механической мощности электропривода, кВт
P_{core}	—	основные потери
k_h, k_e, χ	—	коэффициенты Штейнметца
B_m	—	пик плотности магнитного потока
R_{th}	—	эквивалентное термическое сопротивление, °C/Вт
P_{loss}	—	потери в меди обмотки статора асинхронного двигателя, Вт
I_s	—	ток статора асинхронного двигателя, А
R_s	—	сопротивление статора асинхронного двигателя, Ом
$\psi_{s\alpha}, \psi_{s\beta},$ $\psi_{r\alpha}, \psi_{r\beta}$	—	проекция вектора потокосцепления статора и ротора на оси системы координат $\alpha\beta$, Вб
$U_{s\alpha}, U_{s\beta},$ $U_{r\alpha}, U_{r\beta}$	—	проекция вектора напряжения статора и ротора на оси системы координат $\alpha\beta$, В
$I_{s\alpha}, I_{s\beta}, I_{r\alpha},$ $I_{r\beta}$	—	проекция вектора тока статора и ротора на оси системы координат $\alpha\beta$, А
R_s, R_r	—	активное сопротивление обмотки статора и ротора, Ом
ω_r	—	частота вращения ротора, (рад/с)
σ	—	коэффициент рассеяния, о.е.
k_s	—	коэффициенты рассеяния статора, о.е.
k_r	—	коэффициенты рассеяния ротора, о.е.
$p_0(t)$	—	основная составляющая мгновенное значение мощности, Вт
M	—	коэффициент модуляции, о.е.
V_{LL}	—	среднеквадратичное значение линейного напряжения, В
I_L	—	фазный ток, А
ω_{osc}	—	частота колебаний
I_n, U_n	—	амплитудные значения гармоник тока и напряжения А, В, кратные основной частоте вращения, рад/с
I_m, U_m	—	амплитуды гармоник тока и напряжения А, В, кратные несущей частоте рад/с
f_1, f_n	—	основная и несущая частоты, Гц
I_{nm}, U_{nm}	—	амплитуды комбинационных гармоник тока и напряжения А, В, вызванных взаимодействием основной и несущей частот
m	—	число фаз
l	—	число частотных поддиапазонов
ω_j	—	центральная частота j -го диапазона
$P(\omega)$	—	мощность на данной частоте, Вт

$P(\omega_0)$	—	мощность основной гармоники, Вт
η	—	коэффициент полезного действия электрической машины
K_M	—	средний коэффициент мощности
K_H	—	коэффициент искажений
m	—	число фаз двигателя
P_{nk}	—	мощность n -ной гармоники k -ой фазы двигателя, кВт
$P_k(\omega)$	—	составляющая мгновенной мощности, приходящаяся на частоту ω
U_{nk}	—	напряжение n -ной гармоники k -ой фазы двигателя, В
I_{nk}	—	ток n -ной гармоники k -й фазы двигателя, А
P_{20}	—	мощность основной гармоники поля, Вт
$P_{2\text{несин}}$	—	суммарная мощность искажений, создаваемых высшими гармониками, включая основную, Вт
$P_{2\text{ном}}$	—	мощность на валу в номинальном режиме
$\eta_{\text{ном}}$	—	номинальный коэффициент полезного действия электрической машины
$K_{\text{пере}i}$	—	коэффициент перегрузки при i -ом замере
ρ_i	—	приведенные потери при i -ом замере, определяемые по эксплуатационным характеристикам
$\rho_{ik}(\omega_k)$	—	k -ая гармоническая составляющая в спектре потерь
M	—	число анализируемых гармоник спектра
$K_{\text{вг}k}$	—	весовые коэффициенты, учитывающие значимость k -й гармоники спектра
$T_{\text{р.ост}}$	—	остаточный ресурс
M_e	—	электромагнитного момента асинхронного двигателя
Z_p	—	количество пар полюсов асинхронного двигателя
L_m	—	индуктивность намагничивания, Гн
L_r	—	индуктивность обмотки ротора, Гн
ψ_r	—	потокосцепление ротора, Вб
θ	—	угол между векторами тока статора I_{st} и потокосцеплением ротора ψ_r , рад
$M_{(n)}, M_{(qp)}$	—	составляющие электромагнитного момента Н·м, создаваемые в результате взаимодействия n -ми гармониками тока статора и потокосцепления ротора, q -ой гармоники тока статора и p -ой гармоники потокосцепления ротора
$I_{st(n)}, I_{st(q)}, \psi_{r(n)}, \psi_{r(p)}$	—	гармонические составляющие тока статора и потокосцепления ротора А, Вб
θ_{qp}	—	угол между q -ой гармоникой тока статора и p -ой гармоникой потокосцепления ротора, рад
M_{av}	—	среднее значение электромагнитного момента асинхронного двигателя, Н·м
K_{Me}	—	коэффициент пульсаций электромагнитного момента, определяемый типом и структурой силового преобразователя частоты, о.е.
K_{Me}^*	—	коэффициент пульсаций электромагнитного момента, определяемый видом и уровнем дефекта АД и ИМ электропривода, о.е.
F_n^t	—	нормальная составляющая силы взаимодействия к плоскости контакта
K_{nl} и K_{nu}	—	значения нагруженной и разгруженной контактных жесткости

F_n^t и $F_n^{t-\Delta t}$	—	нормальные упругопластические контактные силы в текущий момент времени t и в предыдущий момент времени $t - \Delta t$
Δt	—	шаг моделирования
Δs_n	—	изменение нормального перекрытия контактов частиц в течение текущего времени
S_n^t и $S_n^{t-\Delta t}$	—	значения нормального перекрытия в текущий и предыдущий момент времени
$F_n^{t-\Delta t}$	—	значение тангенциальной силы в предыдущий момент времени
Δs_τ	—	тангенциальное относительное смещение частиц в течение временного интервала
K_τ	—	тангенциальная жесткость
μ	—	коэффициент трения
M_r^t	—	вектор момента сопротивления качению
$M_{r,\text{lim}}$	—	предельное значение момента сопротивления качению
$M_r^{t-\Delta t}$	—	вектор момента сопротивления качению в предыдущий момент времени; K_r – жесткость качения
ω_{rel}	—	вектор относительной угловой скорости
$K_{I_A}, K_{I_B}, K_{I_C}$	—	расхождение амплитуд сигналов тока на характерных частотах с уровнем сигнала на частоте питающей сети для фаз A, B, C
$K_{U_A}, K_{U_B}, K_{U_C}$	—	расхождение амплитуд сигналов напряжения на характерных частотах с уровнем сигнала на частоте питающей сети для фаз A, B, C
$K_{\text{ЭП}}$	—	динамический коэффициент мощности
K_G	—	коэффициент гармоник (тока и мощности)
$K_{P_A}, K_{P_B}, K_{P_C}$	—	расхождение амплитуд сигналов мощности на характерных частотах с уровнем сигнала на частоте питающей сети для фаз A, B, C
$K_{\text{несим}U}$	—	коэффициент несимметрии напряжения
$K_{\text{несим}I}$	—	коэффициент несимметрии тока
$K_{\text{несим}P}$	—	коэффициент несимметрии мощности
$K_{\Delta P}$	—	коэффициент потери мощности
$\Phi\left(\frac{\tau - \mu}{v\sqrt{\mu\tau}}\right)$	—	функция нормированного нормального распределения
μ	—	параметр масштаба распределения
τ	—	наработка на отказ
$F(\tau)$	—	распределения остаточного ресурса принимают
$I_{\text{ст,max}}$	—	максимально допустимое амплитудное значение фазного тока на выходе инвертора
I_{dij}	—	амплитудные значения гармонических составляющих тока, формируемые при дефектах АД
g_i	—	весовые функции, определяемые с учетом критериев энергоэффективности K_i и работоспособности $\sum K_{Me}$.
$K_{\text{ТС}}$	—	индикатор технического состояния
T	—	средняя температура окружающего воздуха
ρ	—	влажность
ξ	—	прочность изоляции
$v_r(t)$	—	сигнал скорости редуктора
$v_i(t)$	—	сигнал скорости исполнительного органа
P_i	—	прогноз вероятности

t	—	текущий момент времени
Δt	—	интервал времени между измерениями
λ	—	интервал прогнозирования
n	—	число интервалов в прошлое
k	—	число интервалов в будущее
l	—	количество измеряемых характеристик
$P_{im}(m_i), P_{ih}(h_i)$	—	значения вероятностей по электрическим и вибрационным параметрам (m_i – дефект, выявленный при анализе электрических параметров)
N_i	—	косвенные параметры, влияющие на составление прогноза по оценке вероятности безотказной работы
l	—	номер слоя
x_{ijl}	—	i -й входной сигнал j -го нейрона в слое l
w_{ijl}	—	весовой коэффициент i -го входа нейрона номер j слоя l
NET_{jl}	—	сигнал NET нейрона номер j слоя l
θ	—	пороговый уровень данного нейрона
K_1	—	коэффициент, учитывающий состояния границ оценки вибрационных параметров с учетом обнаруженных дефектов в момент времени t и в зависимости от нормального, предкризисного и кризисного состояний
K_2	—	коэффициент, учитывающий состояния границ оценки электрических параметров с учетом наступления (обнаружения) дефектов в момент времени t и в зависимости от нормального, предкризисного и кризисного состояний
K_3	—	коэффициент, учитывающий состояния границ оценки вибрационных параметров с учетом измеряемых параметров и факторов, влияющих на составление прогноза остаточного ресурса, в момент времени t и в зависимости от нормального, предкризисного и кризисного состояний
K_4	—	коэффициент, учитывающий состояния границ оценки электрических параметров с учетом измеряемых параметров и факторов, влияющих на составление прогноза остаточного ресурса, в момент времени t и в зависимости от нормального, предкризисного и кризисного состояний
$P_{ih}(h), P_{im}(m)$	—	значения вероятностей по вибрационным и электрическим параметрам с учетом работы ИНС
$\Delta w_{ij}, \Delta \theta_j$	—	коррекция для весовых коэффициентов и пороговых уровней, с учетом рассчитанного выхода и сравнения полученного выходного вектора y_s с эталоном d_s
ε	—	скорость обучения ИНС
$K_{кз}$	—	глубиной короткого замыкания
i_d, i_q	—	токи, потребляемые асинхронным двигателем (АД) в 2-х фазной вращающейся системе координат- dq
i_A, i_B, i_C	—	токи, потребляемые асинхронным двигателем (АД) в 3-х фазной вращающейся системе координат- ABC
i_M	—	максимальное амплитудное значение тока фазы, А
ω	—	угловая частота питания, рад/с
I_{1p}, U_{1p}	—	амплитуды основных гармоник тока и напряжения в фазе А, В
I, U	—	действующие значения тока и напряжения А, В

P, S	—	полезная и полная мощности Вт, ВА
φ	—	угол сдвига между основной гармоникой фазного тока и напряжением, рад
K_I	—	коэффициент синусоидальности тока, о.е.
K_U	—	коэффициент синусоидальности напряжения, о.е.
I_n	—	амплитудные гармоники тока статора, кратные основной гармонике, А
I_m	—	амплитуды гармоник тока, А, кратные несущей частоте
I_{nm}	—	амплитуды комбинационных гармоник тока статора, А
ω_1	—	частота вращения основной гармонике тока, рад/с
ω_n	—	частота вращения несущей гармонике тока статора, рад/с
f_1, f_n	—	основная и несущая частоты, Гц
f_{rm}	—	частота вращения ротора
n	—	количество шариков в подшипнике
β	—	контактный угол
D_{pit}	—	диаметр окружности центров шаров
D_{ball}	—	диаметр шара
U	—	унитарная матрица левых сингулярных векторов
V	—	унитарная матрица правых сингулярных векторов
Σ	—	диагональная матрица размером $m \times n$, диагональные элементы которой – неотрицательные значения сингулярных чисел матрицы A в порядке убывания
r	—	ранг матрицы A ; соответственно
A_i	—	подматрица i -го подсигнала
$N_{пол}$	—	потенциал энергопотребления
$N_{уст}$	—	установленная мощность
$E_{акт}$	—	потребляемая расчетная активная энергия (час, сутки, месяц, год)
$E_{факт}$	—	фактическое потребление энергии
$E_{норм}$	—	нормативное потребление энергии
$K_{эф}$	—	коэффициент энергоэффективности
$K_{эп}$	—	коэффициент энергопотребления
$K_{удел}$	—	удельное энергопотребление
$P_{буф}, P_{НКТ}$	—	давление в буферном пространстве и НКТ
$\rho_{см}$	—	плотность смеси
H	—	динамический уровень
Q	—	подача насоса
$\eta_{эцн}, \eta_{пэд}$	—	КПД соответственно ЭЦН и ПЭД
I	—	рабочий ток
r	—	сопротивление 1 м кабеля
$L_{каб}$	—	длина кабеля
$N_{тр-р}, N_{су}$	—	мощность, потребляемая трансформатором и станцией управления
ΔE	—	разность между потребляемой активной энергией
$K_{эф}$	—	коэффициент энергоэффективности
$K_{эп факт}$	—	коэффициент энергопотребления для фактических затрат энергии
$K_{эп норм}$	—	коэффициент энергопотребления для нормативных затрат энергии

$K_{удел}$	—	коэффициент удельного энергопотребления
$Q_{ж}$	—	добыча пластовой жидкости, м ³
$H_{дин}$	—	величина динамического уровня, м
$P(t)$	—	вероятность безотказной работы
$\lambda(t)$	—	интенсивность отказов
T_0	—	средняя наработка до отказов
$\omega(t)$	—	параметр потока отказов
$T_{от}$	—	средняя наработка на отказ
$P(tв)$	—	вероятность восстановления
$\mu(t)$	—	интенсивность восстановления
$TВ$	—	среднее время восстановления
R_n	—	назначенный ресурс
$R_{мр}$	—	средний ресурс между капитальными ремонтами
$T_{сл}$	—	средний срок службы
$T_{сх}$	—	средний срок сохраняемости
$\gamma_{сх}$	—	гамма – процентный срок сохраняемости
$K_{г}$	—	коэффициент готовности
$K_{п}$	—	коэффициент готовности
$K_{и}$	—	коэффициент технического использования
$K_{ог}$	—	коэффициент технического использования
T_0	—	средняя наработка на отказ
$T_в$	—	среднее время восстановления
$W_{ппд}$	—	электроэнергия, потребляемая системой ППД, кВт·ч
$W_{дс}$	—	электроэнергия, потребляемая электроприводами насосов добывающих скважин, кВт·ч
$W_{пnh}$	—	электроэнергия, потребляемая пунктами подготовки и сбора нефти, кВт·ч
$W_{днс}$	—	электроэнергия, потребляемая ДНС, кВт·ч
$W_{г}$	—	электроэнергия, расходуемая на компрессионирование газа, кВт·ч
$W_{пг}$	—	электроэнергия, расходуемая на внутрипромысловую перекачку газа, кВт·ч
$W_{сн}$	—	электроэнергия, потребляемая на собственные нужды, кВт·ч
$P_{огр}$	—	ограничение максимальной мощности потребителя НГДП, кВт
$P_{факт}$	—	фактическая мощность УЭЦН, кВт
$P_{уст}$	—	установленная мощность УЭЦН, кВт
$\Delta K_{гс}$	—	коэффициент готовности системы (изменение)
ρ_n	—	средняя плотность нефти, кг/м ³
$Q_ч$	—	часовой объемный дебит по жидкости, м ³ /ч
T	—	время работы, ч
$\Delta Z_{ущ}$	—	ущерб от внезапности нарушения электроснабжения
$\Delta И_{з.п.}$	—	плата за простой производственного персонала за время нарушения электроснабжения
$\Delta Z_{ущ ав}$	—	суммарный ущерб предприятию в аварийном режиме
p_i	—	вероятность возникновения дефекта(-ов) для АД
$\Delta P_{АДi}$	—	последствия (потери электроэнергии, % для наблюдаемого дефекта(-ов) для АД)

R_i	—	риски для выявленных дефектов АД
I	—	первоначальные инвестиции (покупка двигателя)
E_M, E'_L	—	потребленная двигателем энергия механическая и электрическая
E_{MTC}, E'_{LTC}	—	дополнительное потребление механической и электрической энергии с учётом потерь на ТС
p_E	—	стоимость электроэнергии
C_{MRO}	—	стоимость обслуживания
k_{p1}, k_{p2}	—	коэффициенты кумулятивной приведенной стоимости при изменении цены на электроэнергию и обслуживание соответственно
E_{CO2}, p_{CO2}	—	эквивалентное количество и стоимость выбросов CO ₂
E_{CO2TC}	—	эквивалентное количество выбросов CO ₂ обусловленных техническим состоянием
C_D, V_R	—	стоимость вывода из эксплуатации и прибыль от утилизации
B_{vpi}	—	базовый вектор вероятности развития вида потребителей
B_{vpi}	—	внутренняя нормализация базового вектора вероятности развития вида потребителей
$W_f(t)$	—	выделенный тренд потребления электроэнергии на периоде, предшествующем прогнозному
$\Delta W_{iyntf}(t)$	—	изменения потребления энергии с учетом сценарных условий на выделенном диапазоне времени
V_{ij}	—	новые весовые коэффициенты связи между 8 характеристиками инфраструктуры и 6 глобальными вызовами с учетом коэффициента изменения глобальных вызовов
W_{ij}	—	весовые коэффициенты связи между 8 характеристиками инфраструктуры и 6 глобальными проблемами
X_i	—	коэффициент изменения глобальных вызовов
$C_j (j = 1 \dots 8)$	—	текущий уровень значения характеристики инфраструктуры P_j ($j = 1 \dots 8$)
$\Delta \bar{P}_j$ н	—	изменение характеристик инфраструктуры для негативного сценария
$\Delta \bar{P}_j$ п	—	изменение характеристик инфраструктуры для негативного сценария
R_{mj}	—	текущий уровень значения характеристики инфраструктуры
L_j	—	представляет собой средний весовой коэффициент влияния технологического блока на характеристики инфраструктуры
\bar{P}_j	—	положительный представляет собой значение характеристик инфраструктуры Z_{mj}
x_1, x_2	—	реактивное сопротивление статора и ротора, Ом
x_m	—	реактивное сопротивление, Ом
R_a	—	сопротивление статора, Ом
R_2	—	сопротивление ротора, Ом
W_R	—	электрическая частота ротора
W_m	—	механическая скорость вращения, об/мин
W	—	электрическая частота статора
P_W	—	суммарное сопротивление трения и паразитных потерь, Вт
DN	—	напор, м
MW	—	молярная масса, кг/кмоль
R_f	—	плотность входящего потока, кмоль/м ³
ΔP	—	депрессия на насосе, м

<i>NPSHR</i>	—	требуемый чистый положительный напор на всасывании, м
<i>NPSHA</i>	—	имеющийся чистый положительный напор на всасывании, м
P_i	—	давление на входе, кПа
<i>StHead</i>	—	статический напор, действующий на всасывании насоса, м
P_{vap}	—	давление паров жидкости на входе в насос, кПа
g	—	ускорение свободного падения, 9.80665 м/с^2
R_f	—	плотность на входе, кг*моль/м^3
MW_f	—	молекулярная масса входящей жидкости, кг/кг*моль
<i>iStrmEi</i>	—	высота потока, подключенная к входному узлу потока или давления <i>Ei</i> , м
<i>iStrmEx</i>	—	высота входящего потока

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамович, Б. Повышение надежности электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса / Б. Абрамович, Ю. Сычев, С. Бабурин, **Ю. Жуковский** // Инженерная защита. – 2016. – № 1(12). – С. 60-68.
2. Абрамович, Б.Н. Внедрение параллельных активных фильтров для повышения качества электрической энергии в сетях приобского месторождения / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, В.А. Бурчевский, А.А. Вырва, Р.А. Ульбаев, В.В. Полищук // Нефтяное хозяйство. – 2011. – №. 6. – С. 130-132.
3. Абрамович, Б.Н. Выбор структуры, режима работы, основных параметров и места размещения активных систем коррекции величины и гармонического состава тока и напряжения в электрических сетях предприятий минерально-сырьевого комплекса / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев // Современная техника и технологии. – 2015. – №. 6. – С. 116-120.
4. Абрамович, Б.Н. Комплексная система контроля и повышения качества электрической энергии в системах электроснабжения нефтедобывающих предприятий / Б.Н. Абрамович, Д.А. Устинов, Ю.А. Сычев, **Ю.Л. Жуковский** // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2011. – №. 5. – С. 37-40.
5. Абрамович, Б.Н. Коррекция коэффициента мощности в сетях нефтепромыслов с помощью активного фильтра / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, А.В. Медведев, В.В. Старостин, Е.Н. Аболемов, В.В. Полищук // Нефтяное хозяйство. – 2008. – №. 5. – С. 88-90.
6. Абрамович, Б.Н. Методы и средства повышения уровня энергосбережения и энергоэффективности на горных предприятиях / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, Ю.Л. Жуковский // Горное оборудование и электромеханика. – 2015. – №. 5. – С. 25-30.
7. Абрамович, Б.Н. Повышение качества электрической энергии в сетях Приобского месторождения ООО" РН-Юганскнефтегаз" с помощью параллельных активных фильтров / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, В.А. Бурчевский, А.А. Вырва, Р.А. Ульбаев, В.В. Полищук // Промышленная энергетика. – 2011. – №. 6. – С. 49-52. С. 49-52.

8. Абрамович, Б.Н. Повышение качества электрической энергии обеспечение электромагнитной совместимости электрооборудования в сетях нефтедобывающих предприятий с помощью параллельногоактивного фильтра / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, Д.А. Устинов // Технологии электромагнитной совместимости. – 2013. – №. 1. – С. 39-43.
9. Абрамович, Б.Н. Промышленные испытания активного фильтра в промышленных сетях ОАО" Оренбургнефть ТНК-ВР" / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, А.В. Медведев, В.В. Старостин, Е.Н. Аболемов, В.В. Полищук // Промышленная энергетика. – 2008. – №. 10. – С. 42-46.
10. Абрамович, Б.Н. Реконструкция систем коммерческого учета электропотребления нефтегазодобывающих предприятий / Б.Н. Абрамович, А.В. Сираев // Матер. 7-й Международной конф. «Новые идеи в науках о земле». – 2005.
11. Абрамович, Б.Н. Электроснабжение предприятий: Учебное пособие / Б.Н. Абрамович, Ю.Л. Жуковский, Ю.А. Сычев, Д.А. Устинов. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2015. – 297 с. – ISBN 978-5-94211-716-0.
12. Агунов, А.В. Управление качеством электроэнергии при несинусоидальных режимах. – 2009.
13. Азовцев, Ю.А., Баркова Н. А., Доронин В. А. Диагностика и прогноз технического состояния оборудования целлюлозно-бумажной промышленности в рыночных условиях / Ю.А. Азовцев, Н.А. Баркова, В.А. Доронин // Бумага, картон, целлюлоза. – 1999. – №. 5. – С. 102-105.
14. Акимова, Н.А. Монтаж, техническая эксплуатация и ремонт электрического и электромеханического оборудования / Н.А. Акимова, Н.Ф. Котеленец, Н.И. Сентюрихин // М.:«Академия». – 2008.
15. Андрианов, Ю.Д. Робототехника / Ю.Д. Андрианов, Э.П. Бобриков, В.Н. Гончаренко // – М.: Машиностроение. – 1984. – 288 с.

16. Антоненко, И.Н. Информационные системы и практики ТОиР: этапы развития / И.Н. Антоненко, И.Э. Крюков // Главный энергетик. – 2011. – №. 10. – С. 37-44.
17. Анучин, А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов / А.С. Анучин. — М.: Издательский дом МЭИ, 2015. — 373 с.
18. Бабанова, И.С. Способ управления режимами на основе нейросетевого диагностирования неисправностей и оценки технического состояния электроприводного газоперекачивающего агрегата / И.С. Бабанова, **Ю.Л. Жуковский**, Н.А. Королев – DOI 10.18503/2311-8318-2017-3(36)-47-54 // Электротехнические системы и комплексы. – 2017. – № 3(36). – С. 47-54.
19. Бабанова, И.С. Структурно-параметрический синтез алгоритмов эффективного управления электроснабжения электротехнических комплексов / Бабанова И.С., Абрамович Б.Н. // Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр: материалы 2-ой международной научной школы академика К.Н. Трубецкого. – М.: ИПКОН РАН. – 2016. – С. 152-154.
20. Бабурин, С.В. Современные методы неразрушающего контроля и диагностики технического состояния электроприводов горных машин / С.В. Бабурин, **Ю.Л. Жуковский**, А.А. Коржев, А.В. Кривенко // Горное оборудование и электромеханика. – 2009. – №. 9. – С. 34-38.
21. Барков, А.В. Вибрационная диагностика электрических машин в установившихся режимах работы / А.В. Барков, Н.А. Баркова, А.А. Борисов // Санкт-Петербург: Северо-Западный учебный центр. – 2006. – С. 36.
22. Барков, А.В. Интеллектуальные системы мониторинга и диагностики машин по вибрации / А.В. Барков, Н.А. Баркова // Сборник трудов семинара «Современные проблемы вибрационной диагностики и виброзащиты энергетических установок. – 1999. – С. 115-156. С.115–156.
23. Барков, А.В. Методика диагностирования механизмов с электроприводом по потребляемому току / А.В. Барков., Н.А. Баркова. А.А. Борисов, В.В. Федорищев, Д.В. Грищенко // Санкт-Петербург. – 2012.

24. Барков, А.В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации / А.В. Барков, Н.А. Баркова, Ю.А. Азовцев // изд. СПб Государственного морского технического университета, г. СПб. – 2000. – 169 с.
25. Баширов, М.Г. Оценка технического состояния оборудования предприятий нефтегазовой отрасли на основе применения техноценологического метода / М.Г. Баширов, У.Ф. Юмагузин, В.Л. Талаев // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2012. – №. 5. – С. 293-302.
26. Баширов, М.Г. Система автоматизации управления техническим состоянием технологического оборудования нефтегазовых производств / М.Г. Баширов, Р.Н. Бахтизин, Э.М. Баширова, И.С. Миронова // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2011. – №. 3. – С. 26-40.
27. Беляев, Ю.К. Надежность технических систем / Ю.К. Беляев // Справочник, под ред. И. А. Ушакова. – М.: Радио и связь. – 1985. – 608 с, ил.
28. Бороноев, В.В. Эмпирическая модовая декомпозиция пульсовых сигналов / В.В. Бороноев, В.Д. Омпоков, В.А. Козин // Вестник ВСГУТУ. – 2015. – № 1(52). – С. 40-43.
29. Бурков, В.Н. Теория графов в управлении организационными системами / В.Н. Бурков, А.Ю. Заложнев, Д.А. Новиков // М.: СИНТЕГ, 2001. – 124 с.
30. Васильев, Б.Ю. Автоматизированный электропривод машин и установок горного производства. Том 2. Современный промышленный электропривод / Б.Ю. Васильев. – 2-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2023. – 392 с. – ISBN 978-5-507-46906-2. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/323624> (дата обращения: 18.10.2023). – Режим доступа: для авториз. пользователей.
31. Васильев, Б.Ю. Автоматизированный электропривод объектов минерально-сырьевого комплекса (применение, моделирование, исследование) / Б.Ю. Васильев // СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». – 2014.
32. Васильев, Б.Ю. Обеспечение энергетической развязки электроприводов и сетей электроснабжения промышленных электротехнических комплексов /

- Б.Ю. Васильев. В.А. Шпенст, О.В. Калашников, Г.Н. Ульянов – DOI 10.25515/pmi.2018.1.41 // Записки Горного института. – 2018. – Т. 229. – С. 41-49.
33. Васильев, Б.Ю. Энергосберегающий многодвигательный электропривод с индивидуальным управлением приводными двигателями и активной коррекцией коэффициента мощности / Б. Ю. Васильев // Автоматизация в промышленности. – 2017. – № 3. – С. 43-49.
34. Вахитова, Р.И. Энергопотребление установок электроцентробежных насосов при добыче обводненных нефтей / Р.И. Вахитова, В.А. Молчанова // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2016. – № 12. – 108-113.
35. Вейнреб, К. Диагностика неисправностей ротора асинхронного двигателя методом спектрального анализа токов статора / К. Вейнреб // Электричество. – 2012. – №. 7. – С. 51-57.
36. Вершинин, В.И. Электромагнитная и электромеханическая совместимость в электротехнических системах с полупроводниковыми преобразователями / В.И. Вершинин, Э.А. Загривный, А.Е. Козярук // СПб: изд-во СПГГИ(ТУ), 2000. – 68 с.
37. Вольдек, А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек; Учебник для студентов вузов. – Энергия. Ленингр. отд-ние, 1978.
38. Воропай, Н.И. Интегрированные энергетические системы: вызовы, тенденции, идеология / Н.И. Воропай, В.А. Стенников, Е.А. Барахтенко // Проблемы прогнозирования. – 2017. – №. 5. – С. 39-49.
39. Выпханова, Г.В. Правовые проблемы обеспечения экологической и энергетической безопасности угольной отрасли / Г.В. Выпханова // Вестник Университета имени ОЕ Кутафина. – 2020. – №. 3 (67). – С. 66-76.
40. Галяутдинов, И.М. Повышение экономической эффективности добычи нефти на поздней стадии разработки месторождения на основе внедрения энергосберегающих мероприятий / И.М. Галяутдинов: дисс. канд. экон. наук: 08.00.05. – Санкт-Петербург. – 2016. – 169 с.
41. Гаскаров, О.Б. Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры / О.Б. Гаскаров, Т.А. Голинкевич, А.В. Мозгалевский // М.: Сов. Радио. – 1974.

42. Гашимов, М.А. Выявление неисправности стержней ротора асинхронных электродвигателей / М.А. Гашимов, Н.А. Аскеров // Электр. станции. – 1984. – №. 8. – С. 60-62.
43. Гашимов, М.А. Диагностирование неисправностей обмотки статора электрических машин / М.А. Гашимов, Г.А. Гаджиев, С.М. Мирзоева // Электрические станции. – 1998. – №. 11. – С. 30-35.
44. Герасимов, Д.О. Методы моделирования режимов интегрированных мультиэнергетических систем на базе концепции энергетического хаба в системах имитационного моделирования / Д.О. Герасимов, К.В. Суслов // Энергетик. – 2022. – №. 10. – С. 32-36.
45. Глебов, И.А. Дополнительные потери в роторе синхронного генератора и его электромагнитный момент при работе под нагрузкой выпрямителя / И.А. Глебов // Электра 17. – 1971. – С. 14–27.
46. Гольдберг, О.Д. Инженерное проектирование и САПР электрических машин / О.Д. Гольдберг, И. С. Свириденко. – 2008.
47. Гольдин, А.С. Вибрация роторных машин / А.С. Гольдин // М.: Машиностроение. – 1999. – 344 с.
48. Горбань, А.Н. Обучение нейронных сетей / А.Н. Горбань // М. Изд-во ПараГраф. – 1990г. – 160 с.
49. ГОСТ 30372-95 Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения. ИПКИздателство стандартов 1998. 11 с.
50. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.
51. ГОСТ ИЕС 60034-18-31-2014 Машины электрические вращающиеся. Часть 18-31. Оценка функциональных показателей систем изоляции. Методы испытаний для шаблонных обмоток. – М.: Стандартинформ, 2015. – 26 с.
52. ГОСТ ISO 20958-2015 Контроль состояния и диагностика машин. Сигнатурный анализ электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя. – М.: Стандартинформ, 2019. – 29 с.

53. ГОСТ ИСО. 10817-1: 2002 Вибрация //Системы измерений вибрации вращающихся валов. Часть 1. Устройства для снятия сигналов относительной и абсолютной вибрации.
54. ГОСТ Р 27.102-2021 Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. – М.: ФГБУ "РСТ", 2021 – 46 с.
55. ГОСТ Р 51317.3.2-99 (МЭК 61000-3-2-95). Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний. – Введ. 1999-12-24. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1999.
56. ГОСТ Р 51750-2001 «Энергосбережение. Методика определения энергоемкости при производстве продукции и оказании услуг в технологических энергетических системах. Общие положения». М.: ИПК Издательство стандартов. – 2001. [Электронный ресурс] – Режим доступа: - URL: <http://www.gosthelp.ru/gost/gost6713.html>
57. ГОСТ Р МЭК/ТС 60034-17-2009. Машины электрические вращающиеся. Часть 17. Руководство по применению асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором при питании от преобразователей. – М.: Стандартиформ, 2011. – 20 с.
58. Григорьев, Е.А. Обоснование рациональной структуры и параметров адаптивной системы технического обслуживания и ремонта погрузочно-доставочных машин: дис. – Санкт-Петербургский государственный горный институт им. ГВ Плеханова. – 2003.
59. Гук, Ю.Б. Теория и расчет надежности систем электроснабжения / Ю.Б. Гук, Н.А. Казак, А.В. Мясников. – Энергия, 1970.
60. Гутаревич, В.О. Методика расчета механических напряжений в огневом днище крышки цилиндра дизеля горнотранспортной машины / В.О. Гутаревич, Е.В. Рябко – DOI 10.21440/0536-1028-2018-3-65-71 // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2018. – № 3. – С. 65-71.

61. Доросинский, Л.Г. Информационные технологии поддержки жизненного цикла изделия / Л.Г. Доросинский, О.М. Зверева – 2016.
62. Дроздов, А.Н. Технология и техника добычи нефти погружными насосами в осложненных условиях: учебное пособие / А.Н. Дроздов // М.: Макс Пресс. – 2008. – 312 с.
63. Дрыгин, М.Ю. Применение информационных систем для повышения эффективности ТОИР горного оборудования / М.Ю. Дрыгин – DOI 10.26730/1816-4528-2021-1-18-26 // Горное оборудование и электромеханика. – 2021. – № 1(153). – С. 18-26.
64. Ершов, М.С. Влияние высших гармоник тока на эффективность частотно-регулируемых электроприводов / М.С. Ершов, М.Ю. Чернев // Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли. – 2016. – С. 126-130.
65. Ершов, М.С. Диспетчерское управление системами электроснабжения распределенных объектов нефтяной и газовой промышленности / М.С. Ершов, А.В. Егоров, Г.Н. Малиновская, А.А. Трифонов, // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени ИМ Губкина. – 2014. – №. 3. – С. 126-145.
66. Ершов, М.С. Моделирование вентильного привода для расчета режимов и процессов промышленных электротехнических систем / М.С. Ершов, А.В. Егоров, А.С. Улюмджиев // Промышленная энергетика. – 2012. – №. 6. – С. 26-29.
67. Ершов, М.С. Потери энергии в элементах электрической сети частотно-регулируемого погружного электродвигателя установки добычи нефти / М.С. Ершов, М.Ю. Чернев, Н.Г. Джумамухамбетов // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2016. – Т. 3. – №. 1. – С. 86-89. С. 86-89.
68. Ершов, М.С. Функциональные задачи АСУ электроснабжением. Оценка надежности и оперативный расчет режимов систем электроснабжения / М.С. Ершов, М.С. Ершов, Г.Н. Малиновская, А.А. Трифонов // Территория Нефтегаз. – 2010. – №. 6. – С. 128-133.
69. Жуковский, Ю.Л. Взаимозависимость между техническими состояниями составных узлов электромеханического оборудования и их влияние на

диагностические параметры / **Ю.Л. Жуковский** // Материалы XIII Международной молодёжной научной конференции «Севергеоэкотех-2012». Изд.: УГТУ, Ухта. – 2013. – С. 59-63.

70. **Жуковский, Ю.Л.** Влияние технологических изменений в сфере энергоэффективности на износ инфраструктуры в топливно-энергетическом комплексе / **Ю.Л. Жуковский, В.В. Старшая** // Энерго-ресурсоэффективность в интересах устойчивого развития. – 2018. – С. 373-374.

71. **Жуковский, Ю.Л.** Внедрение системы энергосбережения и энергоэффективности на предприятиях металлургического комплекса / **Ю.Л. Жуковский, Е.В. Сизякова** // Записки горного института. – 2013. – Т. 202. – С. 155-160.

72. **Жуковский, Ю.Л.** Диагностика и оценка остаточного ресурса электромеханического оборудования машин и механизмов (научная монография) / **Ю.Л. Жуковский, А.А. Коржев, А.Е. Козярук, А.В. Кривенко, С.В. Бабурин, М.С. Черемушкина** // Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», СПб. – 2013. – 90 с.

73. **Жуковский, Ю.Л.** Диагностика и оценка остаточного ресурса электромеханического оборудования машин и механизмов / **Ю.Л. Жуковский** // Доклады научно-методического семинара «Методы и средства наладки электроприводов». Изд.: МЭИ, Москва. – 2014. – С. 34-47

74. **Жуковский, Ю.Л.** Исследование применения цифровых технологий для управления жизненным циклом оборудования / **Ю.Л. Жуковский** // Сборник научных трудов международной научной конференции «Энерго-ресурсоэффективность в интересах устойчивого развития». Изд.: ТПУ, Томск. – 2018. – С. 375-376

75. **Жуковский, Ю.Л.** Классификация способов повышения эффективности процесса измельчения и реализация энергоэффективных алгоритмов управления двухдвигательным электроприводом мельницы / **Ю.Л. Жуковский, Я.М. Малькова** // Горное оборудование и электромеханика. – 2022. – №. 4. – С. 20-35.

76. **Жуковский, Ю.Л.** Лаборатория диагностики и оценки остаточного ресурса электромеханического оборудования / **Ю.Л. Жуковский** // Сборник трудов X Международной научно-практической конференции «Инженерные, научные и образовательные приложения на базе технологий National Instruments. Изд.: ДМК-пресс, Москва. – 2011. – С. 275-277.
77. **Жуковский, Ю.Л.** Мониторинг компетенций специалистов с целью устойчивого развития горной отрасли / **Ю.Л. Жуковский** // Сборник научных трудов II Всероссийской научной конференции «Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса». Изд.: Санкт-Петербургский горный университет, СПб. – 2018. – С. 559-567.
78. **Жуковский, Ю.Л.** Оценка технического состояния и остаточного ресурса электромеханического агрегата с асинхронным двигателем / **Ю. Л. Жуковский, Н.А. Королев, И. С. Бабанова** // Горное оборудование и электромеханика. – 2017. – № 6(133). – С. 20-25.
79. **Жуковский, Ю.Л.** Применение технологии "промышленного интернета вещей" для управления жизненным циклом электромеханического оборудования / **Ю.Л. Жуковский** // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2017. – 2017. – С. 147-151.
80. **Жуковский, Ю.Л.** Применение технологии цифровых двойников для управления жизненным циклом электрооборудования / **Ю.Л. Жуковский, А.Д. Булдыско** // Электроэнергетика глазами молодежи-2018. – 2018. – С. 189-190.
81. **Жуковский, Ю.Л.** Система мониторинга и оценки остаточного ресурса силового электрооборудования / **Ю. Л. Жуковский, А.Е. Козярук, А.А. Коржев, А.В. Кривенко** // Записки Горного института. – 2008. – Т. 178. – С. 17-21.
82. **Жуковский, Ю.Л.** Система обслуживания по фактическому состоянию на основе комплексного метода диагностики электромеханического оборудования / **Ю.Л. Жуковский** // Материалы XVIII Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: Эффективность, надежность, безопасность». Изд.: СПб ГРАФИКС, Томск. – 2012. – С. 20-22

83. **Жуковский, Ю.Л.** Техническая диагностика и прогнозирование состояния электромеханического оборудования на основе технологии "промышленного интернета вещей" / **Ю.Л. Жуковский** // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования. – 2017. – Т. 1. – С. 33-39.
84. **Жуковский, Ю.Л.** Управление программой технического обслуживания и ремонта электромеханического оборудования на основе интегрированной информационно-аналитической системы / **Ю.Л. Жуковский**, Н.И. Котелева // Промышленная энергетика. – 2017. – №. 7. – С. 14-20.
85. **Жуковский, Ю.Л.** Энерго-ресурсосбережение посредством совершенствования принципов и методов технического обслуживания и ремонта электромеханического оборудования / **Ю.Л. Жуковский** // Вестник Башкирского государственного педагогического университета им. М. Акмуллы. – 2014. – № 1/2. – С. 70-76.
86. Жуковский, Ю.Л. Энергосбережение и энергоэффективность. Цифровая энергетика учебное пособие / Ю.Л. Жуковский, А.А. Бельский, В.В. Старшая; научный редактор В.А. Шпенст; редактор А.К. Банкович. - Санкт-Петербург: Лема, 2020. - 93 с.: ил. - Библиогр.: с. 88-92. - 100 экз. – ISBN 978-5-00105-560-0 (в обл.): Б. ц. - Текст: непосредственный.
87. Захарченко, В.Е. Опыт виртуальной пусконаладки АСУ ТП в нефтяной отрасли / В.Е. Захарченко, Н.А. Зарубин, Я.А. Ледаков // Деловой журнал Neftegaz. RU. – 2020. – №. 6. – С. 46-49.
88. Золотарев, И.В. Прогнозирование энергоэффективности УЭЦН / И.В. Золотарев, С.Н. Пещеренко, Е.В. Пошвин // Бурение и нефть. – 2013. – №. 9. – С. 62-65.
89. Зырянов, В.М. Применение устройств ограничения высших гармоник на основе батарей статических конденсаторов в автономной энергосистеме / В.М. Зырянов, Н.Г. Кирьянова, Н.А. Митрофанов – DOI 10.17212/1814-1196-2018-2-131-142 // Системы анализа и обработки данных. – 2018. – №. 2 (71). – С. 131-142.

90. Иванов, С.Л. Повышение ресурса трансмиссий горных машин на основе оценки энергонагруженности их элементов / С.Л. Иванов // СПб.: РИЦ СПГГИ (ТУ). – 1999.
91. Ивановский, В.Н. Энергетика добычи нефти в осложненных условиях (часть 1) / В.Н. Ивановский, А.А. Сабиров, С.А. Карелина // Территория Нефтегаз. – 2013. – №. 10. – С. 102-106.
92. Ивановский, В.Н. Энергетика добычи нефти: основные направления оптимизации энергопотребления / В.Н. Ивановский // Инженерная практика. – 2011. – №. 6. – С. 9-18.
93. Калимуллин, Л.В. Основные тенденции и сценарии развития мировой энергетики / Л.В. Калимуллин // Всероссийский экономический журнал ЭКО. – 2019. – №. 3 (537). – С. 66-82.
94. Калинов, А.П., Анализ методов вибродиагностики асинхронных двигателей / А.П. Калинов, О.В. Браташ // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2012. – №. 5. – С. 43-51.5.
95. Каялов, Г.М. Определение максимума нагрузки произвольных электроприёмников / Г.М. Каялов // Электричество. – 1937. – № 9(10). – С. 29–34.
96. Квагинидзе, В.С. Анализ систем технического обслуживания и ремонта горного оборудования, применяемые на угольных разрезах Южной Якутии / В.С. Квагинидзе, А.В. Ахременков // ГИАБ. – 2009. – Т. 10. – №12. – С. 286-292. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-sistem-tehnicheskogo-obsluzhivaniya-i-remonta-gornogo-oborudovaniya-primenyaemye-na-ugolnyh-razrezah-yuzhnoy-yakutii> (дата обращения: 19.10.2022).
97. Ключев, В.В. Машиностроение. Энциклопедия. Измерения, контроль, испытания и диагностика. –Т. III–7 / В.В. Ключев, Ф.Р. Соснин, В.Н. Филинов // М.: Машиностроение. – 1996. – 464 с., ил.
98. Козярук, А.Е. Диагностика и оценка остаточного ресурса электромеханического оборудования, работающего в тяжелых условиях, по электрическим параметрам / А.Е. Козярук, **Ю.Л. Жуковский**, С.В. Бабурин

- А.А. Коржев, А.В. Кривенко // Записки горного института. – 2011. – Т. 192. – С. 162-167.
99. Козярук, А.Е. Исследование базовых алгоритмов модуляции системы управления двухуровневым инвертором / А.Е. Козярук, Б.Ю. Васильев, Е.Е. Шелудченко, В. Мбуен – DOI 10.18503/2311-8318-2018-4(41)-41-47 // Электротехнические системы и комплексы. – 2018. – № 4(41). – С. 41-47.
100. Козярук, А.Е. К оценке величины остаточного ресурса силового электрооборудования / А.Е. Козярук, **Ю.Л. Жуковский**, А.А. Коржев, А.В. Кривенко // Горное оборудование и электромеханика. – 2008. – № 1. – С. 26-29.
101. 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. – С. 8-14.
102. Коломийцов, М.Д. Метод оценки качества эксплуатации горных машин / М.Д. Коломийцов // Записки Горного института. – 1991. – Том 126. – С. 107.
103. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. для вузов. – Высшая школа, 2001.
104. Копылов, И.П. Электрические машины в 2 т. Том 1: учебник для вузов / И.П. Копылов. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2023. – 267 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-534-03222-2. – Текст: электронный // [сайт]. – URL: <https://urait.ru/bcode/512718> (дата обращения: 23.10.2023).
105. Королёв, Н.А. Особенности разработки систем диагностики частотно-регулируемого электропривода / Н.А. Королёв, **Ю.Л. Жуковский** // Динамика систем, механизмов и машин. – 2019. – Т. 7. – №. 2. – С. 37-43.
106. Кувшинов, Н.Е. Методы и способы акустической диагностики электродвигателей / Н.Е. Кувшинов // Форум молодых ученых. – 2017. – №. 7 (11). – С. 442-445.

107. Кудрин, Б.И. Ценологическое определение параметров электропотребления многономенклатурных производств / Б.И. Кудрин, Б.В. Жилин, О.Е. Лагуткин, М.Г. Ошурков // Тула: Приок. кн. изд-во. – 1994. – Т. 122. – С. 3.
108. Кузнецов, Н.Л. Надежность электрических машин / Н.Л. Кузнецов – 2006.
109. Кузьмин, О.В. Анализ структуры гармонических рядов динамики на базе алгоритма сингулярного разложения / О.В. Кузьмин, В.С. Кедрин // Проблемы управления. – 2013. – №. 1. – С. 26-31.
110. Кузьмичев, Н.П. Кратковременная эксплуатация скважин для добычи вязкой нефти с помощью УЭЦН / Н.П. Кузьмичев // Деловой журнал Neftegaz. ru. – 2015. – №. 3. – С. 28-35.
111. Лукинов, А.П. Проектирование мехатронных и робототехнических устройств. // – М.: – 2012. Издательство «Лань». – 2021. – 608 с.
112. Ляхомский, А.В. Интегрированная система управления энергоресурсами предприятий минерально-сырьевого комплекса / А.В. Ляхомский, Ю.П. Миновский, Е.Н. Перфильева, Н.Б. Дьячков. – Москва: Горная книга, 2013. – 12 с. – ISBN 0236-1493.
113. Макоклюев, Б.И. Краткосрочное прогнозирование электропотребления в энергосистемах России / Б.И. Макоклюев, А.С. Полижаров, А.С. Басов, Ю.Э. Алла, С.В. Локтионов // Электрические станции. – 2018. – № 4. – С. 24-35.
114. Мелентьев, Л.А. Научные основы теплофикации и энергоснабжения городов и промышленных предприятий / Л.А. Мелентьев // Избранные труды. – 1993.
115. Мелехина, К.А. Моделирование и оптимизация процесса рудоподготовки комплексных руд при их дезинтеграции в мельнице самоизмельчения / К.А. Мелехина, П.П. Ананьев, А.В. Плотникова, А.С. Тимофеев, С.А. Шестак – DOI 10.25018/0236-1493-2020-10-0-95-105 // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – №. 10. – С. 95-105.
116. Мельниченко, В.Е. Опыт работы оборудования УЭЦН в условиях повышенного содержания мехпримесей на месторождениях ОАО «Славнефть-

- Мегионнефтегаз» / В.Е. Мельниченко, А.С. Жданов // Инженерная практика. – 2010. – №. 2. – С. 32.
117. Мищенко, И.Т. Скважинная добыча нефти: Учебное пособие для вузов / И.Т. Мищенко // М.: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. – 2003. – 816 с.
118. Муравлев, О.П. Перспективы разработки и применения асинхронных двигателей для энергосберегающих технологий / О.П. Муравлев, О.О. Муравлева // Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития: Труды IV Междунар. конф. по автоматизированному электроприводу. – 14-17 сент. 2004 г., Магнитогорск, 2004. – С. 193-195.
119. Назарычев, А.Н. Методы и математические модели комплексной оценки технического состояния электрооборудования: научное издание / А.Н. Назарычев, Д.А. Андреев; Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, Петербургский энергетический институт повышения квалификации руководящих работников и специалистов. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет, 2005. – 223 с. – ISBN 5-89482-188-6.
120. Назарычев, А.Н. Оценка состояния двигателей электростанций при применении комплекса методов диагностики / А.Н. Назарычев, А. С. Страхов, Е. М. Новоселов [и др.] – DOI 10.34831/EP.2023.1101.4.004 // Электрические станции. – 2023. – № 4(1101). – С. 23-30.
121. Назарычев, А.Н. оценка технического состояния и расчет эксплуатационной надежности электродвигателей / А.Н. Назарычев // Энергоэксперт. – 2011. – № 3. – С. 62.
122. Назарычев, А.Н. Оценка технического состояния электрооборудования на основе расчетов интегральных показателей / А.Н. Назарычев, Э.В. Новомлинский, Д.А. Андреев // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. – 2016. – С. 171-179.2016. – С. 171-179.
123. Нгуен, Т.Х. Анализ автономных роботизированных машин горного производства с автономными системами электродвижения / Т.Х. Нгуен, Б.Ю.

Васильев // Горное оборудование и электромеханика. – 2022. – № 5(163). – С. 59-69.

124. Неисправная работа электрооборудования: прямой путь к аварии и пожару // Промышленная и экологическая безопасность, охрана труда. – 2015. – №3. – URL: <https://prominf.ru/article/neispravnaya-rabota-elektrooborudovaniya-pryamou-put-k-avarii-i-pozharu> (дата обращения: 19.10.2022).

125. Никиян, Н.Г. О влиянии климатических факторов и режимов работы на эксплуатационную надежность асинхронных двигателей / Н.Г. Никиян, И.И. Ямансарин // Вестник Государственного инженерного университета Армении. Серия: Электротехника, энергетика. – 2013. – №. 1. – С. 27-35.

126. Новиков, В.А. Электропривод в современных технологиях / Новиков В.А., Савва С.В., Татаринцев Н.И. // – М.: Академия. – 2014. – 400с.

127. Новоселов, Е.М. Контроль состояния "беличьей клетки" электродвигателя по гармоникам от токов фиктивной обмотки ротора / Е.М. Новоселов, Н.Н. Коновалов // Энергия-2018. – 2018. – С. 127-127.

128. Осипов, О.И. Частотно-регулируемый асинхронный электропривод: учеб. пособие по курсу «Типовые решения и техника соврем. Электропривода» для студентов, обучающихся по направлению "Электротехника, электромеханика и электротехнологии" / О. И. Осипов; М-во образования и науки Рос. Федерации, Моск. энергет. ин-т (техн. ун-т). – Москва: Изд-во МЭИ, 2004. - 79, [1] с.: ил., табл.; 20 см.; ISBN 5-7677-0291-8 (в обл.)

129. Осипова, Н.В. Выбор параметров алгоритма управления загрузкой мельницы мокрого самоизмельчения железной руды / Н.В. Осипова – DOI 10.25018/0236_1493_2021_10_0_146 // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – №. 10. – С. 146-156.

130. Патент № 2425390 С1 Российская Федерация, МПК G01R 31/34. Способ диагностики и оценки остаточного ресурса электроприводов переменного тока: № 2009142097/28: заявл. 16.11.2009: опубл. 27.07.2011 / А.Е. Козярук, Ю.Л. Жуковский, С.В. Бабурин, А.А. Коржев, Е.Е. Васильева; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального

образования "Санкт-Петербургский государственный горный институт имени Г.В. Плеханова (технический университет)".

131. Патент № 2425391 С1 Российская Федерация, МПК G01R 31/34. Способ диагностики технического состояния электродвигателя по его электрическим параметрам: № 2009142082/28: заявл. 16.11.2009: опубл. 27.07.2011 / А.Е. Козярук, **Ю.Л. Жуковский**, М.С. Черемушкина [и др.]; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный горный институт имени Г.В. Плеханова (технический университет)".

132. Патент № 2505917 С1 Российская Федерация, МПК H02P 9/02. Система автономного электроснабжения: № 2012146725/07: заявл. 01.11.2012: опубл. 27.01.2014 / Б.Н. Абрамович, **Ю.Л. Жуковский**, Ю.А. Сычев; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный минерально-сырьевой университет "Горный".

133. Патент № 2532762 С1 Российская Федерация, МПК G01R 31/34. способ диагностики и оценки остаточного ресурса электроприводов переменного тока: № 2013135607/28: заявл. 29.07.2013: опубл. 10.11.2014 / **Ю.Л. Жуковский**, С.И. Таранов; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный минерально-сырьевой университет "Горный".

134. Патент № 2626231 С1 Российская Федерация, МПК G01R 31/34. Способ диагностики технического состояния и оценки остаточного ресурса электромеханического агрегата с асинхронным двигателем: № 2016144271: заявл. 10.11.2016: опубл. 24.07.2017 / **Ю.Л. Жуковский**, И.С. Бабанова, Н.А. Королев; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет".

135. Патент № 2648413 С1 Российская Федерация, МПК G05B 13/02, G06N 3/02, G05B 19/00. Способ управления режимами на основе нейросетевого диагностирования неисправностей и технического состояния электроприводного

газоперекачивающего агрегата: № 2017101942: заявл. 20.01.2017: опубл. 27.03.2018 / **Ю.Л. Жуковский**, И С. Бабанова, Н.А. Королев; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет".

136. Патент № 2727386 С1 Российская Федерация, МПК G01R 31/34. Устройство диагностики и оценки остаточного ресурса электродвигателей: № 2019134080: заявл. 23.10.2019: опубл. 21.07.2020 / Н.А. Королев, Б.Ю. Васильев, **Ю.Л. Жуковский**, Н.О. Желтиков; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет".

137. Патент № 2791428 С1 Российская Федерация, МПК G01R 31/34. Способ выявления оборванных стержней в короткозамкнутой обмотке ротора асинхронного электродвигателя: № 2022127059: заявл. 17.10.2022: опубл. 07.03.2023 / А. С. Страхов, Е. М. Новоселов, Д. А. Полкошников [и др.]; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина".

138. Патент на полезную модель № 181087 U1 Российская Федерация, МПК G01R 31/34. Устройство диагностики двигателей переменного тока с преобразователем частоты: № 2017136959: заявл. 19.10.2017: опубл. 04.07.2018 / **Ю.Л. Жуковский**, Б.Ю. Васильев, Н.А. Королев; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

139. Петроченков, А.Б. О подходах к оценке технического состояния электротехнических комплексов и систем / А.Б. Петроченков // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2012. – №. 12. – С. 16-20.

140. Полищук, В.В. Исследование высших гармоник при регулировании УЦЭН с помощью преобразователей частоты / В.В. Полищук, Д.В. Евсеенко, В.Б. Прохорова // Энергетика Тюменского региона. 2001. № 4. – С. 35-37.

141. Полищук, В.В. Управление энергетическими потоками на предприятиях горной промышленности / В.В. Полищук, Д.М. Тарасов // «Машино-строение и автоматизация производства». Межвузовский сборник выпуск 17.: СПб. 1999. с. 152-159.
142. Поршневу, С.В. Применение метода SSA для анализа технологической информации, собираемой информационным комплексом ТЭЦ / С.В. Поршневу, К.З. Аронсон, И.В. Соломаха // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2008. – Т. 313. – №. 5. – С. 161-168.
143. Пронин, М.В. Создание систем с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями на основе комплекса быстродействующих уточненных моделей. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В. Плеханова. Санкт-Петербург, 2006.
144. Пронин, М.В. Электромеханотронные комплексы и их моделирование по взаимосвязанным подсистемам / Пронин М.В., Воронцов А.Г. // – СПб.: Ладога. – 2017. – 222 с.
145. Радимов, Н.В. Диагностирование асинхронного электродвигателя для электроприводов теплового насоса и компрессорных установок методом спектрального анализа потребляемого тока с применением пакета spectralab / Н.В. Радимов, С.Ю. Труднев, А.А. Марченко // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2016. – Т. 12. – №. 1. – С. 39-45.
146. Ревняков, Е.Н. Применение метода k-ближайших соседей в задаче распознавания / Е.Н. Ревняков, Е.Ю. Данилина // World Science: Problems And Innovations: сборник статей XXXIII Международной научно-практической конференции, Пенза, 30 июня 2019 года. – Пенза: "Наука и Просвещение" (ИП Гуляев Г.Ю.), 2019. – С. 73-75.
147. Розенберг, Г.Ш. Вибродиагностика. Монография. / Г.Ш. Розенберг, Е.З. Мадорский, Е.С. Голуб и др.; Под ред. Г. Ш. Розенберга. – СПб.: ПЭИПК, 2003. –284 с.

148. Романова, В.В. Анализ степени влияния несимметрии питающего напряжения на эксплуатационную надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей / В.В. Романова, С.В. Хромов, А.Г. Батухтин, К.В. Суслов – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-4-131-141 // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24, № 4. – С. 131-141.
149. Русов, В. А. Спектральная вибродиагностика/В. А. Русов //М.: ВиброЦентр. – 1996.
150. Русов, В. А. Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам / В. А. Русов. – 2012.
151. Русов, В.А. Диагностика, прогнозирование и управление эксплуатацией роторного оборудования на основе информации от систем мониторинга / В. А. Русов // Диагностирование и прогнозирование технического состояния оборудования электростанций. – 2020. – С. 26-38.
152. Савельев, В.А. Экспериментально-аналитическое определение диагностического признака дефектов обмотки ротора асинхронного электродвигателя / В.А. Савельев, А.С. Страхов, Е.М. Новоселов, А.А. Скоробогатов, И.Н. Сулыненков // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2018. – №. 4. – С. 44-53.
153. Саушев, А.В. Теоретические основы управления состоянием электротехнических систем / А.В. Саушев // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала СО Макарова. – 2010. – №. 3 (7). – С. 134-146.
154. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023660650 Российская Федерация. Программа распознавания наличия дефекта подшипника асинхронного двигателя: № 2023617330: заявл. 19.04.2023: опубл. 23.05.2023 / **Ю.Л. Жуковский**, А.Д. Булдыско; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».
155. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017614351 Российская Федерация. Генератор электрических и вибрационных

сигналов электрической машины переменного тока для технической диагностики и оценки остаточного ресурса: № 2017611561: заявл. 27.02.2017: опубл. 12.04.2017 / **Ю.Л. Жуковский**, Н.И. Котелева, Н.А. Королев; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

156. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021669187 Российская Федерация. Программа управления преобразователями частоты для лабораторного стенда "Конвейерный транспорт" для ПЛК Schneider Electric M580: № 2021668566: заявл. 22.11.2021: опубл. 24.11.2021 / **Ю.Л. Жуковский**, И.И. Белоглазов, М.Ю. Николаев; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

157. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020615940 Российская Федерация. Программа для определения оптимальных параметров систем управления асинхронного двигателя электропривода с преобразователем частоты: № 2020615940; заявл. 18.05.2020; зарегистр. 04.06.2020; опубл. 04.06.2020 / **Жуковский Ю.Л.**, Королёв Н.А. Васильев Б.Ю.; заявитель «Санкт-Петербургский горный университет». – 2 с.

158. Сербиновский, Б.Б. Современные методы диагностики механических повреждений асинхронного электропривода / Б.Б. Сербиновский, В.А. Рогачев – 2005. – С. 48-51.\

159. Сивокобыленко, В.Ф. Диагностика состояния короткозамкнутых роторов асинхронных машин / В.Ф. Сивокобыленко, Н. Абделбассет // Электричество. – 1997. – №. 3. – С. 25-26.

160. Сидельников, Л.Г. Обзор методов контроля технического состояния асинхронных двигателей в процессе эксплуатации / Л.Г. Сидельников, Д.О. Афанасьев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология, нефтегазовое и горное дело. – 2013. – №. 7. – С. 127-137.

161. Смоловик, С.В. Анализ технического состояния электрических сетей 0, 38-110 кВ Российской Федерации / С.В. Смоловик, Ф.Х. Халилов // Труды Кольского научного центра РАН. – 2011. – №. 5. – С. 24-29.
162. Станкевич, Л.А. Искусственный интеллект и искусственный разум в робототехнике: учебное пособие / Станкевич Л.А., Юревич Е.И. // – 2012. – 167с.
163. Страхов, А. С. Разработка методов контроля технического состояния обмоток роторов электродвигателей собственных нужд электростанций в пусковом режиме: специальность 05.14.02 "Электрические станции и электроэнергетические системы": автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / А.С. Страхов – Иваново, 2022. – 20 с.
164. Страхов, А.С. Разработка анализатора спектра для исследования сигналов от электродвигателей / А.С. Страхов, Е.М. Новоселов, С.Н. Литвинов [и др.] // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XIX Бенардосовские чтения): Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 175-летию со дня рождения Н.Н. Бенардоса, Иваново, 31 мая – 02 2017 года. Том I. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2017. – С. 126-130.
165. Сычев, Ю.А. Фильтрокомпенсирующие устройства с активными преобразователями для повышения качества электроэнергии в электротехнических комплексах нефтегазовых предприятий / Сычев Юрий Анатольевич; Санкт-Петербургский горный университет. – Санкт-Петербург, 2021. – 365 с.
166. Таджибаев, А.И. Автоматизированные системы распознавания состояний электроустановок / А.И. Таджибаев – СПб.: Энергоатомиздат. – 2001.
167. Таджибаев, А.И. Математические модели и оценка состояния электроустановок на основе анализа температурных пространств / А.И. Таджибаев, В.В. Титков. – СПб.: ПЭИПК. – 2005. – 76 с.
168. Тэттэр, В.Ю. Диагностирование подшипниковых и редукторных узлов на переходных режимах / В.Ю. Тэттэр, А.Ю. Тэттэр, В.С. Барайщук // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля.–2005.–Ч. – 2005. – Т. 2.

169. Уразаков, К.Р. Метод расчета динамических нагрузок и энергопотребления штанговой установки с системой автоматического уравнивания / К.Р. Уразаков, В.А. Молчанова, П.М. Тугунов // Записки Горного института. – 2020. – Т. 246. – С. 640-649.
170. Хадеев, Н.Р. Эффективность энергосбережения на нефтедобывающем предприятии / Н.Р. Хадеев: дисс. канд. экон. наук: 08.00.05. – Казань. – 2001. – 155 с.
171. Хацкелевич, А.Н. Особенности развития рынка асинхронных двигателей в Уральском федеральном округе / А.Н. Хацкелевич, А.А. Тренина. // Контентус. – 2017. – №. 5 (58). – С. 7-14.
172. Хвалин, Д.И. Моделирование электромагнитного поля мощной электрической машины / Д.И. Хвалин, О.Г. Кенсицкий, К.А. Кобзарь // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2021. – Т. 64. – №. 2. – С. 130-142.
173. Хечоян, Н.А. Стратегия развития предприятий электротехнической промышленности в условиях дефицита инвестиционных ресурсов / Н.А. Хечоян // Московский экономический журнал. – 2019. – №. 7. – С. 80-80.
174. Чубич, В.М. Вычисление производных информационной матрицы Фишера по компонентам входного сигнала в задаче активной параметрической идентификации стохастических нелинейных непрерывно-дискретных систем / В.М. Чубич, Е.В. Филиппова // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2010. – №. 2. – С. 53-64.
175. Шидловский, А.К. Повышение качества энергии в электрических сетях. Монография / А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов. – Киев. Наукова Думка. – 1985. – 270 с.
176. Ширман, А.Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А.Р. Ширман, А.Б. Соловьев. – М., 1996. – 276 с.
177. Шишлянников, Д.И. Оценка энергоэффективности функционирования и увеличение наработки гидравлических приводов установок штанговых скважинных насосов в осложненных условиях эксплуатации / Д.И. Шишлянников,

В.Ю. Зверев, А.Г. Звонарева, С.А. Фролов, А.А. Иванченко // Записки Горного института. – 2023. – Т. 261. – С. 349-362.

178. Юдина, З.А. Причины возникновения вибрации в агрегате электронасосном космического аппарата и способы ее снижения / З.А. Юдина, М.И. Синиченко, А.П. Ладыгин, Ф.К. Синьковский, Д.Б. Усманов – DOI 10.26732/j.st.2021.2.01 // Космические аппараты и технологии. – 2021. – №. 2 (36). – С. 63-76.

179. Юревич, Е.И. Управление роботами и робототехническими системами / Е.И. Юревич // Учебное пособие. – Санкт-Петербург: СПбГТУ. – 2000. – 171 с.

180. Яковлева, Э.В. Анализ перспектив регионального развития интеллектуальных энергетических систем / Э.В. Яковлева, Е.В. Сизякова, П.В. Иванов, Ю.Л. Жуковский, Т.В. Пудкова // Российский экономический интернет-журнал. – 2018. – №. 2. – С. 107.

181. Abramovich, B.N. Development of Forecasting Models to Manage the Power Consumption Modes of the Gas Industry Facilities / B.N. Abramovich, I.S Babanova, I.S. Tokarev – DOI 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271495 // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – IEEE, 2020. – С. 1-5.

182. Abu-Zeid, M.A. Bearing problems' effects on the dynamic performance of pumping stations / M.A. Abu-Zeid, S.M. Abdel-Rahman // Alexandria Engineering Journal. – 2013. – Т. 52. – №.3. – С. 241-248.

183. Adouni, A. Thermal analysis of low-power three-phase induction motors operating under voltage unbalance and inter-turn short circuit faults / A. Adouni, J.A. Marques Cardoso – DOI 10.3390/machines9010002 // Machines. – 2020. – Т. 9. – №. 1. – С. 2. – URL: <https://www.mdpi.com/2075-1702/9/1/2>. (дата обращения: 23.10.2023).

184. Alatalo, M. Electric machine design for traction applications considering recycling aspects-review and new solution / M. Alatalo, S.T. Lundmark, E.A. Grunditz – DOI 10.1109/IECON.2011.6119585 // IECON 2011-37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – IEEE, 2011. – С. 1836-1841. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6119585>. (дата обращения 25.10.2023).

185. Alderighi, M. Power converters for future LHC experiments / M. Alderighi, M. Citterio Riva, S. Latorre, A. Costabeber, A. Paccagnella, F. Sichirollo, G. Spiazzi, M. Stellini, P. Tenti, P. Cova, N. Delmonte, A. Lanza, M. Bernardoni, R. Menozzi, S. Baccaro, F. Iannuzzo, A. Sanseverino, G. Busatto, V. De Luca, F. Velardi – DOI 10.1088/1748-0221/7/03/C03012 // Journal of Instrumentation. – 2012. T. 7. C. 1-15.
186. AlShorman, O. A review of artificial intelligence methods for condition monitoring and fault diagnosis of rolling element bearings for induction motor / O. AlShorman, M. Irfan, N. Saad, D. Zhen, N. Haider, A. Glowacz, A. AlShorman – DOI 10.1155/2020/8843759 // Shock and vibration. – 2020. – T. 2020. – C. 1-20.
187. Amponsah, N.Y. Greenhouse gas emissions from renewable energy sources: A review of lifecycle considerations / N.Y. Amponsah, M. Troldborg, B. Kington, I. Aalders, R.L. Hough – DOI 10.1016/j.rser.2014.07.087 // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – T. 39. – C. 461-475.
188. Ayani, M. Digital Twin: Applying emulation for machine reconditioning: 51st CIRP Conference on Manufacturing Systems / M. Ayani, M. Ganebäck, A.H.C. Ng – DOI 10.1016/j.procir.2018.03.139 // Procedia CIRP. – 2018. – T. 72. – C. 243-248.
189. Babanova, I.S. Electric energy consumption modes forecasting and management for gas industry enterprises based on artificial intelligence methods / I.S. Babanova, I.S. Tokarev, B.N. Abramovich, K.V. Babyr – DOI 10.1109/ElConRus51938.2021.9396389 // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). – IEEE, 2021. – C. 1382-1385.
190. Ballal, M.S. Wing technique: A novel approach for the detection of stator winding inter-turn short circuit and open circuit faults in three phase induction motors / M.S. Ballal, D.M. Ballal, H.M. Suryawanshi, M.K. Mishra – DOI 10.6113/JPE.2012.12.1.208 // Journal of power electronics. – 2012. – T. 12. – №. 1. – C. 208-214. – URL: https://www.researchgate.net/profile/Makarand-Ballal/publication/264182167_Wing_Technique_A_Novel_Approach_for_the_Detection_of_Stator_Winding_Inter-Turn_Short_Circuit_and_Open_Circuit_Faults_in_Three_Phase_Induction_Motors/link

s/56038e1808ae460e2704e9fe/Wing-Technique-A-Novel-Approach-for-the-Detection-of-Stator-Winding-Inter-Turn-Short-Circuit-and-Open-Circuit-Faults-in-Three-Phase-Induction-Motors.pdf. (дата обращения: 20.09.2021).

191. Barabady, J. Reliability analysis of mining equipment: A case study of a crushing plant at Jajarm Bauxite Mine in Iran / J. Barabady, U. Kumar – DOI 10.1016/j.ress.2007.10.006 // Reliability Engineering & System Safety. – 2008. – Т. 93. – № 4. – С. 647-653.

192. Bbosa, L.S. Development of a novel methodology to determine mill power draw / L.S. Bbosa, I. Govender, A. Mainza – DOI 10.1016/j.minpro.2016.02.009 // International Journal of Mineral Processing. – 2016. – Т. 149. – С. 94-103.

193. Benbouzid, M.E.H. Induction motor asymmetrical faults detection using advanced signal processing techniques / M.E.H. Benbouzid, H. Nejari, R. Beguenane, M. Vieira – DOI 10.1109/60.766963 // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 1999. – Т. 14. – №. 2. – С. 147-152. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/766963> (дата обращения: 19.10.2023).

194. Benbouzid, M.E.H. A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection / M.E.H. Benbouzid // IEEE transactions on industrial electronics. – 2000. – Т. 47. – №. 5. – С. 984-993. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/873206> (дата обращения: 20.09.2021).

195. Bettega, E. Active harmonic conditioners and unity power factor rectifiers / E. Bettega, J.N. Fiorina // Cahier technique № 183. Schneider Electric. 1999. 36 p.

196. Bibak, Z. A combined physical and DEM modelling approach to investigate particle shape effects on load movement in tumbling mills / Z. Bibak, S. Banisi – DOI 10.1016/j.appt.2021.01.034 // Advanced Powder Technology. – 2021. – Т. 32. – №. 3. – С. 916-930.

197. Bichurin, M. Magnetolectric current sensors / M. Bichurin, R. Petrov, V. Leontiev, G. Semenov, O. Sokolov – DOI 10.3390/s17061271 // Sensors. – 2017. – Т. 17. – №. 6. – С. 1271. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/6/1271> (дата обращения: 19.10.2023).

198. Bonnett, A.H. Analysis of rotor failures in squirrel-cage induction motors / A.H. Bonnett, G.C Soukup – DOI 10.1109/28.17488 // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1988. – Т. 24. – №. 6. – С. 1124-1130. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/17488>. (дата обращения: 19.10.2023).
199. Bottani, E. From the Cyber-Physical System to the Digital Twin: the process development for behaviour modelling of a Cyber Guided Vehicle in M2M logic / E. Bottani, A. Cammardella, T. Murino, S. Vespoli // XXII Summer School Francesco TurcoIndustrial Systems Engineering. – 2017. – С. 1-7. – URL: <http://www.summerschool-aidi.it/edition-2017/cms/extra/papers/75-%20Bottani%20et%20al-with-numbers.pdf>. (дата обращения: 23.10.2023).
200. Brkovic, A. Early fault detection and diagnosis in bearings for more efficient operation of rotating machinery / A. Brkovic, D. Gajic, J. Gligorijevic, I. Savic-Gajic, O. Georgieva, S. Di Gennaro – DOI 10.1016/j.energy.2016.08.039 // Energy. – 2017. – Т. 136. – С. 63-71. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544216311525> (дата обращения: 19.10.2023).
201. Caseiro, J.A.A. Fault diagnosis on a PWM rectifier AC drive system with fault tolerance using the average current Park's vector approach / J.A.A. Caseiro, A.M.S. Mendes, A.J.M. Cardoso – DOI 10.1109/IEMDC.2009.5075281 // 2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference. – IEEE, 2009. – С. 695-701. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5075281> (дата обращения: 19.10.2023).
202. Clark II, W. W. The Third Industrial Revolution / W.W. Clark II, M.J.G. Cooke – DOI 10.1016/B978-1-85617-804-4.00002-1 // Sustainable Communities Design Handbook. – Butterworth-Heinemann, 2010. – С. 9-22. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9781856178044000021> (дата обращения: 04.04.2020).
203. Collombet, C. Harmonic disturbances in networks, and their treatment / C. Collombet, J.M. Lupin, J. Schonek // Cahier technique № 152. Schneider Electric. 1999. 31 p.

204. Cruz, M.A. Rotor cage fault diagnosis in three-phase induction motors by extended Park's vector approach / M.A. Cruz, S. AJ Marques Cardoso – DOI 10.1080/073135600268261 // *Electric Machines & Power Systems*. – 2000. – Т. 28. – №. 4. – С. 289-299. – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/073135600268261> (дата обращения: 19.10.2023).
205. Cunningham, P. k-Nearest neighbour classifiers: (with Python examples) / P. Cunningham, S.J. Delany – DOI 10.1145/3459665 // arXiv preprint arXiv:2004.04523. – 2020. – URL: <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/3459665> (дата обращения: 19.10.2023).
206. Currents in bearings of induction motors of electric drives with semiconductor converter / A.E. Kozjaruk, B.U. Vasilev, S.A. Shtop, N.A. Serdukov – DOI 10.1109/ACED.2018.8341707 // *Proceedings - 2018 17th International Ural Conference on AC Electric Drives, ACED 2018: 17, Ekaterinburg, 26–30 марта 2018 года. Vol. 2018-April*. – Ekaterinburg, 2018. – P. 1-5.
207. Curreri, F. Soft sensor transferability: A survey / F. Curreri, L. Patanè, M. Xibilia – DOI 10.3390/app11167710 // *Applied Sciences*. – 2021. – Т. 11. – №. 16. – С. 7710. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7379058> (дата обращения: 19.10.2023).
208. Das, A. Process monitoring and fault detection strategies: a review / A. Das, J. Maiti, R.N. Banerjee – DOI 10.1108/02656711211258508 // *International Journal of Quality & Reliability Management*. – 2012. – Т. 29. – №. 7. – С. 720-752.
209. Devine-Wright, P. My neighbourhood, my country or my planet? The influence of multiple place attachments and climate change concern on social acceptance of energy infrastructure / P. Devine-Wright, S. Batel – DOI 10.1016/j.gloenvcha.2017.08.003 // *Global Environmental Change*. – 2017. – Т. 47. – С. 110-120. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378016304472> (дата обращения: 15.04.2022).

210. Dolan, S.L. Life cycle greenhouse gas emissions of utility-scale wind power: systematic review and harmonization / S.L. Dolan, G.A. Heath – DOI 10.1111/j.1530-9290.2012.00464.x // *Journal of Industrial Ecology*. – 2012. – Т. 16. – С. S136-S154.
211. Douglas, C.A. Life cycle assessment of the Seagen marine current turbine / C.A. Douglas, G.P. Harrison, J.P. Chick – DOI 10.1243/14750902JEME94 // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. – 2008. – Т. 222. – №. 1. – С. 1-12.
212. Duhamel, P. Fast Fourier transforms: a tutorial review and a state of the art / P. Duhamel, M. Vetterli – DOI 10.1016/0165-1684(90)90158-U // *Signal processing*. – 1990. – Т. 19. – №. 4. – С. 259-299. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/016516849090158U> (дата обращения: 19.10.2023).
213. Dybkowski, M. Artificial neural network application for current sensors fault detection in the vector controlled induction motor drive / Dybkowski M., Klimkowski K. – DOI 10.3390/s19030571 // *Sensors*. – 2019. – Т. 19. – №. 3. – С. 571. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/3/571> (дата обращения: 19.10.2023).
214. Esakimuthu Pandarakone, S. comparative study between machine learning algorithm and artificial intelligence neural network in detecting minor bearing fault of induction motors / S. Esakimuthu Pandarakone, Y. Mizuno, H. Nakamura – DOI 10.3390/en12112105 // *Energies*. – 2019. – Т. 12. – №. 11. – С. 2105. – URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/11/2105> (дата обращения: 19.10.2023).
215. Evgeniou, T. Support vector machines: Theory and applications / T. Evgeniou, M. Pontil – DOI 10.1007/3-540-44673-7_12 // *Advanced Course on Artificial Intelligence*. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1999. – С. 249-257
216. Faiz, J. Impact of Rotor Broken Bars Fault on Life Span of a Three-phase Squirrel-cage Induction Motor / J. Faiz, A.M. Takbash – 2013.
217. Fenger, M. Development of a tool to detect faults in induction motors via current signature analysis / M. Fenger, B.A. Lloyd, W.T. Thomson – DOI 10.1109/CITCON.2003.1204707 // *Cement Industry Technical Conference*, 2003.

- Conference Record. IEEE-IAS/PCA 2003. – IEEE, 2003. – С. 37-46. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1204707> (дата обращения: 19.10.2023).
218. Gao, R. Cloud-enabled prognosis for manufacturing / R. Gao, L. Wang, R. Teti, D. Dornfeld, S. Kumara, M. Mori, M. Helu – DOI 10.1016/j.cirp.2015.05.011 // CIRP annals. – 2015. – Т. 64. – №. 2. – С. 749-772.
219. Geng, R. Digital Twin in smart manufacturing: remote control and virtual machining using VR and AR technologies / R. Geng, M. Li, Z. Hu, Z. Han, R. Zheng – DOI 10.1016/j.procir.2021.02.010 // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2022. – Т. 65. – №. 11. – С. 321. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827121006612> (дата обращения: 23.10.2023).
220. Github.org: Официальный сайт Инициатива «Большой двадцатки» - URL: <https://www.github.org/countries/russian-federation> (дата обращения: 09.11.2020). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей. – Текст: электронный.
221. Global AC Electric Motor Sales in Oil and Gas Market Report and Forecast 2023-2028. [Электронный ресурс] // Expert Market Research. – URL: <https://www.expertmarketresearch.com/reports/ac-electric-motor-sales-in-oil-and-gas-market> (дата обращения: 28.02.2021).
222. Gnacinski, P. Derating of an induction machine under voltage unbalance combined with over or undervoltages / P. Gnacinski – DOI 10.1016/j.enconman.2008.12.006 // Energy Conversion and Management. – 2009. – Т. 50. – №. 4. – С. 1101-1107.
223. Golyandina, N. Basic Singular Spectrum Analysis and forecasting with R / N. Golyandina, A. Korobeynikov – DOI 10.1016/j.csda.2013.04.009 // Computational Statistics & Data Analysis. – 2014. – Т. 71. – С. 934-954
224. Golyandina, N. Particularities and commonalities of singular spectrum analysis as a method of time series analysis and signal processing / N. Golyandina – DOI 10.1002/wics.1487 // Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics. – 2020. – Т. 12. – №. 4. – С. e1487.
225. He, F. Electrical bearing failures in electric vehicles / F. He, G. Xie, J. Luo – DOI 10.1007/s40544-019-0356-5 // Friction. – 2020. – Т. 8. – С. 4-28. – URL:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s40544-019-0356-5#citeas> (дата обращения: 19.10.2023).

226. Hong, S.H. Effects of lifter bars on the ball motion and aluminum foil milling in tumbler ball mill / S.H. Hong, B.K. Kim – DOI 10.1016/S0167-577X(02)00778-4 // *Materials Letters*. – 2002. – Т. 57. – №. 2. – С. 275-279.

227. IEA (2011), *Energy Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-policy-opportunities-for-electric-motor-driven-systems>, License: CC BY 4.0. (дата обращения: 28.02.2021). – Текст: электронный.

228. IEA (2015), *Energy efficiency roadmap for electric motors and motor systems*, IEA, Paris <https://www.iea-4e.org/document/378/energy-efficiency-roadmap-for-electric-motors-and-motor-systems>, License: CC BY 4.0. (дата обращения: 28.02.2021). – Текст: электронный.

229. IEA (2023), *Electricity Market Report 2023*, IEA, Paris URL: <https://www.iea.org/reports/electricity-market-report-2023>, License: CC BY 4.0. (дата обращения: 30.08.2023). – Текст: электронный.

230. Isham, M.F. Variational mode decomposition: mode determination method for rotating machinery diagnosis / M.F. Isham, M.S. Leong, M.H. Lim, Z.A. Ahmad – DOI 10.21595/jve.2018.19479 // *Journal of Vibroengineering*. – 2018. – Т. 20. – № 7. – С. 2604-2621.

231. Jones, A.W. Perceived barriers and policy solutions in clean energy infrastructure investment / A.W. Jones – DOI 10.1016/j.jclepro.2015.05.072 // *Journal of Cleaner Production*. – 2015. – Т. 104. – С. 297-304. - URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615006277>. (дата обращения: 03.02.2023).

232. Kessides, I.N. Towards a sustainable global energy supply infrastructure: Net energy balance and density considerations / Kessides I. N., Wade D. C. – DOI 10.1016/j.enpol.2011.05.032 // *Energy Policy*. – 2011. – Т. 39. – №. 9. – С. 5322-5334. - URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421511004186>. (дата обращения: 03.10.2022).

233. Khalyasmaa, A.I. Review of the Digital Twin Technology Applications for Electrical Equipment Lifecycle Management – DOI 10.3390/math11061315 / A.I. Khalyasmaa, A.I. Stepanova, S.A. Eroshenko, P.V. Matrenin // Mathematics. – 2023. – №. 6. – URL: <https://www.mdpi.com/2227-7390/11/6/1315> (дата обращения: 09.09.2023).
234. Klyuev, R.V. Methods of Forecasting Electric Energy Consumption: A Literature Review / R.V. Klyuev, I.D. Morgoev, A.D. Morgoeva, O.A. Gavrina, N.V. Martyushev, E.A. Efremenkov, Q. Mengxu – DOI 10.3390/en15238919// Energies. – 2022. – Т. 15. – № 23.
235. Korolev, N. Efficiency increase of energy systems in oil and gas industry by evaluation of electric drive lifecycle / N. Korolev, A. Kozyaruk, V. Morenov – DOI 10.3390/en14196074 // Energies. – 2021. – Vol. 14, No. 19. - URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/19/6074> (дата обращения: 25.09.2021).
236. Korolev, N.A. Problems of diagnostics of asynchronous motor powered by an autonomous voltage inverter / N.A. Korolev, S.V. Solovyev, **Y.L. Zhukovskiy** – DOI 10.1088/1757-899X/643/1/012022// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, 2019, Volume 643, Issue 1, pp. 012022. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/643/1/012022/pdf>. (дата обращения: 04.10.2021).
237. Koteleva, N.A soft sensor for measuring the wear of an induction motor bearing by the park's vector components of current and voltage / N. Koteleva, N. Korolev, **Y. Zhukovskiy**, G. Baranov – DOI 10.3390/s21237900 // Sensors. – 2021. – Vol. 21, No. 23.
238. 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 – DOI 10.1088/1742-6596/1753/1/012058 // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 1753. – №. 1. – С. 012058.

239. Koteleva, N.I. Identification of the technical condition of induction motor groups by the total energy flow / N.I. Koteleva, N.A. Korolev, **Y.L. Zhukovskiy** – DOI 10.3390/en14206677 // *Energies*. – 2021. – Vol. 14, No. 20.
240. Kritzinger, W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification / W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar, J. Henjes, W. Sihn – DOI 10.1016/j.ifacol.2018.08.474 // *Ifac-PapersOnline*. – 2018. – Т. 51. – №. 11. – С. 1016-1022. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318316021>. (дата обращения: 23.10.2023).
241. Kryukov, O.V. Intelligent control of electric machine drive systems / O.V. Kryukov, D.A. Blagodarov, N.N. Dulne, Y.M. Safonov, N.N. Fedortsov, A.A. Kostin – DOI 10.1109/ICEPDS.2018.8571670 // 2018 X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS). – IEEE, 2018. – С. 1-4.
242. Kumar, R.R. A Comprehensive Review of Conventional and Intelligence-Based Approaches for the Fault Diagnosis and Condition Monitoring of Induction Motors / R.R. Kumar, M. Andriollo, G. Cirrincione, M. Cirrincione, A. Tortella – DOI 10.3390/en15238938 // *Energies*. – 2022. – Т. 15. – № 23.
243. Kumar, S. Vibration based fault diagnosis techniques for rotating mechanical components: review paper / S. Kumar, M. Loksha, K. Kumar, K. Srinivas – DOI 10.1088/1757-899X/376/1/012109 // *Proceedings of the International Conference on Advances in Manufacturing, Materials and Energy Engineering*. – 2018. – С. 1–6. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/376/1/012109/meta>. (дата обращения: 23.10.2023).
244. Lavrik, A.Y. Optimizing the size of autonomous hybrid microgrids with regard to load shifting / A.Y. Lavrik, **Y.L. Zhukovskiy**, P.S. Tsvetkov – DOI 10.3390/en14165059 // *Energies*. – 2021. – Т. 14. – №. 16. – С. 5059.
245. Lavrik, A.Y. Potential for electric consumption management in the conditions of an isolated energy system in a remote population / A.Y. Lavrik, O.S. Vasilkov, A.V. Semenyuk, **Y.L. Zhukovskiy** – DOI 10.21177/1998-4502-2020-12-4-583-591 // *Sustain. Dev. Mt. Territ.* – 2020. – Т. 12. – №. 4. – С. 583-591.

246. Lei, Y. Applications of machine learning to machine fault diagnosis: A review and roadmap / Y. Lei, B. Yang, X. Jiang, F. Jia, N. Li, A.K. Nandi – DOI 10.1016/j.ymsp.2019.106587 // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2020. – № 138.
247. Liang, L. Bearing fault diagnosis based on singular value distribution of impulse response segment / L. Liang, C. Liu, F. Liu – DOI 10.1016/j.isatra.2022.08.015 // *ISA Transactions*. – 2023. – Т. 134. – С. 511-528.
248. Liang, L. Feature Extraction Using Sparse Kernel Non-Negative Matrix Factorization for Rolling Element Bearing Diagnosis / L. Liang, X. Ding, F. Liu, Y. Chen, H. Wen – DOI 10.3390/s21113680 // *Sensors*. – 2021. – Т. 21. – № 11. – С. 3680.
249. Litvinenko, V.S. Digital economy as a factor in the technological development of the mineral sector / V.S. Litvinenko – DOI 10.1007/s11053-019-09568-4 // *Natural Resources Research*. – 2020. – Т. 29. – №. 3. – С. 1521-1541. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11053-019-09568-4#citeas> (дата обращения: 30.06.2020).
250. Liu, R. Artificial intelligence for fault diagnosis of rotating machinery: A review / R. Liu, B. Yang, E. Zio, X. Chen – DOI 10.1016/j.ymsp.2018.02.016 // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2018. – № 108. – С. 33–47.
251. Magadán, L. Low-cost real-time monitoring of electric motors for the Industry 4.0 / L. Magadán, F.J. Suárez, J.C. Granda, D.F. García – DOI 10.1016/j.promfg.2020.02.057 // *Procedia manufacturing*. – 2020. – Т. 42. – С. 393-398.
252. Mais, J. Spectrum Analysis. The key features of analyzing spectra. // SKF USA, Inc. – URL: https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d1968024acef-CM5118-EN-Spectrum-Analysis_tcm_12-113997.pdf. (дата обращения 26.02.2023)
253. Manikandan, S. Fault diagnosis of various rotating equipment using machine learning approaches—A review / S. Manikandan, K. Duraivelu – DOI 10.1177/0954408920971976 // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. – 2021. – Т. 235. – №. 2. – С. 629-642. – URL: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0954408920971976>.

254. Marfoli, A. Squirrel cage induction motor: A design-based comparison between aluminium and copper cages / A. Marfoli, M. Di Nardo, M. Degano, C. Gerada, W. Jara – DOI 10.1109/OJIA.2021.3073820 // IEEE Open Journal of Industry Applications. – 2021. – Т. 2. – С. 110-120. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9406341>.
255. Melnykov, V. The Correction of the Operation Modes for Frequency-Controlled Induction Motor with Scalar Control under Stator Windings Damage Appearance / V. Melnykov – DOI 10.1109/MEES52427.2021.9598710 // 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). – IEEE, 2021. – С. 1-6. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9598710>.
256. Mendes, A.M.S. Voltage source inverter fault diagnosis in variable speed AC drives, by the average current Park's vector approach / A.M.S. Mendes, A.J.M. Cardoso – DOI 10.1109/IEMDC.1999.769220 // IEEE International Electric Machines and Drives Conference. IEMDC'99. Proceedings (Cat. No. 99EX272). – IEEE, 1999. – С. 704-706. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/769220> (дата обращения: 19.10.2023).
257. Meng, R. A Survey and Analysis on Electricity Consumption of Raw Material Mill System in China Cement Industry between 2014 and 2019 / R. Meng, Q. Zhao, M. Wu, Q. Long, M. Zhou – DOI 10.3390/su13031126 // Sustainability. – 2021. – Т. 13. – №. 3. – С. 1126.
258. Menghal, P.M. Artificial Intelligence-Based Real-Time Control of Induction Motor Using dSPACE Controller / P.M. Menghal, A. Jaya Laxmi – DOI 10.1007/978-981-15-8221-9_75 // International Conference on Automation, Signal Processing, Instrumentation and Control. – Singapore: Springer Nature Singapore, 2020. – С. 801-815. – URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-8221-9_75#citeas.
259. Minenergo.gov.ru: Официальный сайт Министерства энергетики Российской Федерации (Минэнерго России): сайт. – Москва, 2019. – URL: <https://minenergo.gov.ru/node/11201> (дата обращения: 09.11.2020). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей. – Текст: электронный.

260. Minenergo.gov.ru: Официальный сайт Министерства энергетики Российской Федерации (Минэнерго России): сайт. – Москва, 2019. – URL: <https://minenergo.gov.ru/sites/default/files/documents/11/10/1920/document-66308.pdf?ysclid=lnvnbq0t3q385185737> (дата обращения: 09.11.2020). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей. – Текст: электронный.
261. Minenergo.gov.ru: Официальный сайт Министерства энергетики Российской Федерации (Минэнерго России): сайт. – Москва, 2019. – URL: <https://minenergo.gov.ru/node/22853?ysclid=lnvuskjl7i719046029> (дата обращения: 09.11.2020). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей. – Текст: электронный.
262. Mitchell Jr, Z.W. A statistical analysis of construction equipment repair costs using field data and the cumulative cost model / Z. W Mitchell Jr. // дис. – Virginia Polytechnic Institute and State University, 1998.
263. Moomaw, W. Annex II: Methodology. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation / W. Moomaw, P. Burgherr, G. Heath // Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY. – USA. – 2011.
264. Nikolaev, A.V. Application of the cybernetic approach to price-dependent demand response for underground mining enterprise electricity consumption / A.V. Nikolaev, S. Vöth, A.V. Kychkin – DOI 10.31897/PMI.2022.33 // Journal of Mining Institute. – 2023. – Т. 261, – С. 403-414. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/application-of-the-cybernetic-approach-to-price-dependent-demand-response-for-underground-mining-enterprise-electricity-consumption>. (дата обращения: 10.10.2023).
265. Niu, Y. Effects of digitalization on energy efficiency: Evidence from Zhejiang Province in China / Y. Niu, X. Lin, H. Luo, J. Zhang, Y. Lian – DOI 10.3389/fenrg.2022.847339 // Frontiers in Energy Research. – 2022. – Т. 10. – С. 847339. – URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2022.847339/full>.
266. Nugent, D. Assessing the lifecycle greenhouse gas emissions from solar PV and wind energy: A critical meta-survey / D. Nugent, B.K. Sovacool – DOI 10.1016/j.enpol.2013.10.048 // Energy Policy. – 2014. – Т. 65. – С. 229-244.

267. O'Sullivan, J.N. The social and environmental influences of population growth rate and demographic pressure deserve greater attention in ecological economics / J.N. O'Sullivan – DOI 10.1016/j.ecolecon.2020.106648 // Ecological Economics. – 2020. – Т. 172. – С. 106648. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800919310201> (дата обращения: 20.11.2021).
268. Ostroverkhov, V.V. Condition assessment and diagnostics of asynchronous electric motors using signature analysis of consumed current / V.V. Ostroverkhov, N.V. Nalivaiko – DOI 10.3103/S1068371220110097 // Russian Electrical Engineering. – 2020. – Т. 91. – С. 714-723. – URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068371220110097>.
269. Parker, R.P.M. Energy and carbon audit of an offshore wave energy converter / R.P.M. Parker, G.P. Harrison, J.P. Chick – DOI 10.1243/09576509JPE483 // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy. – 2007. – Т. 221. – №. 8. – С. 1119-1130.
270. Pronin, M. Computer model-based evaluation of energy losses components in the systems with asynchronous machines and transistor converters / M. Pronin, O. Shonin, A. Vorontsov, V. Tereschenkov // IECON. Nov. 5-8,2007, Taipei, Taiwan.
271. Qi, Q. Digital twin service towards smart manufacturing / Q. Qi, F. Tao, Y. Zuo, D. Zhao – DOI 10.1016/j.procir.2018.03.103 // Procedia Cirp. – 2018. – Т. 72. – С. 237-242.
272. Rassõlkin, A. Life cycle analysis of electrical motor-drive system based on electrical machine type / A. Rassõlkin, A. Belahcen, A. Kallaste, T. Vaimann, D.V. Lukichev, S. Orlova, J.P. Acedo – DOI 10.3176/proc.2020.2.07 // Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. – 2020. – Т. 69. – №. 2. – С. 162-177. – URL: https://acris.aalto.fi/ws/portalfiles/portal/43850231/ELEC_Rassolkin_etal_Life_Cycle_Analysis_ProcEstAcaSci_69_finalpublishedversion.pdf. (дата обращения 25.10.2023).
273. rcm2.ru: сайт RCM Navigator. RCM: революционное управление надёжностью.: сайт. – Москва, 2021. – URL: <http://rcm2.ru/stati-ob-rcm/rcm-revolucionnoe-upravlenie-nadyozhnostyu/> (дата обращения: 09.11.2020). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей. – Текст: электронный.

274. Renm, Y. Ensemble classification and regression-recent developments, applications and future directions / Y. Ren, L. Zhang, P.N. Suganthan – DOI 10.1109/MCI.2015.2471235 // IEEE Computational intelligence magazine. – 2016. – Т. 11. – №. 1. – С. 41-53. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7379058> (дата обращения: 19.10.2023).
275. Revin, I. Automated machine learning approach for time series classification pipelines using evolutionary optimization / I. Revin, V.A. Potemkin, N.R. Balabanov, N.O. Nikitin – DOI 10.1016/j.knosys.2023.110483// Knowledge-Based Systems. – 2023. – Т. 268. – С. 110483. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950705123002332> (дата обращения: 19.10.2023).
276. Reyers, B. Global targets that reveal the social–ecological interdependencies of sustainable development / B. Reyers, E.R. Selig – DOI 10.1038/s41559-020-1230-6 // Nature Ecology & Evolution. – 2020. – Т. 4. – №. 8. – С. 1011-1019. - URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/17/5268>. (дата обращения: 22.11.2020).
277. Salleh, N.A.M. The study on optimization of streamlined process flow based on delmia quest simulation in an automotive production system / N.A.M. Salleh, S. Kasolang, M.A. Mustakim, N.A. Kuzaiman – DOI 10.1016/j.procs.2017.01.206// Procedia Computer Science. – 2017. – Т. 105. – С. 191-196. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050917302284>. (дата обращения: 23.10.2023).
278. Sankaranarayanan, S. Data Flow and Distributed Deep Neural Network based low latency IoT-Edge computation model for big data environment / S. Sankaranarayanan, J.J. Rodrigues, V. Sugumaran, S. Kozlov – DOI 10.1016/j.engappai.2020.103785 // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2020. – Vol. 94. – 103785.
279. Shabalov, M.Y. The influence of technological changes in energy efficiency on the infrastructure deterioration in the energy sector / M.Y. Shabalov, **Y.L. Zhukovskiy**, A.D. Buldysko, B. Gil, V.V. Starshaia – DOI 10.1016/j.egy.2021.05.001 // Energy Reports. – 2021. – Т. 7. – С. 2664-2680. URL:

- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484721002717> (дата обращения: 07.11.2022).
280. Sharon, D. Reactive power definition and power factor improvement in non-linear systems, IEE Proceedings, Vol 120, No 6, pp 704-706, June 1973.
281. Shirley, M. Understanding the Fundamentals of Motor Current Signature Analysis / M. Shirley, A. Champneys, N. Marrin, M. Moore, B. Piette, A. Shaw – 2022. – URL: <https://www.cambridge.org/engage/miir/article-details/6177fe750f3eeb361171776f> (дата обращения: 25.10.2022).
282. Shklyarskiy, Y. Distortion load identification based on the application of compensating devices / Y. Shklyarskiy, A. Skamyin, I. Vladimirov, F. Gazizov – DOI 10.3390/en13061430 // Energies. – 2020. – Т. 13. – №. 6. – С. 1430. – URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/6/1430> (дата обращения: 19.10.2023).
283. Silva, J.L.H. Bearing failures diagnosis in three-phase induction motors by extended Park's vector approach / J.L.H. Silva, A.J.M. Cardoso – DOI 10.1109/IECON.2005.1569315 // 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005. – IEEE, 2005. – С. 6 pp. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1569315> (дата обращения: 19.10.2023).
284. Simsek, Y. An analysis of additional energy requirement to meet the sustainable development goals / Y. Simsek, W.G. Santika, M. Anisuzzaman, T. Urmee, P.A. Bahri, R. Escobar – DOI 10.1016/j.jclepro.2020.122646 // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Т. 272. – С. 122646. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620326937>. (дата обращения: 17.09.2020).
285. Smirnov, M. Power factor correction and active filtering technology application for industrial power systems with non-linear loads / M. Smirnov, R. Grinberg, M. Riabchitsky, Y. Rozanov // ЕРЕРЕМС 2006. Portoroz, 2007. С. 1484-1489.
286. Sribovornmongkol, T. Evaluation of motor online diagnosis by FEM simulations / T. Sribovornmongkol. – Skolan för elektro-och systemteknik, Kungliga Tekniska högskolan, 2006.

287. Steinmann, Z.J.N. A methodology for separating uncertainty and variability in the life cycle greenhouse gas emissions of coal-fueled power generation in the USA / Z.J. Steinmann, M. Hauck, R. Karuppiah, I.J. Laurenzi, M.A. Huijbregts – DOI 10.1007/s11367-014-0717-2 // The international journal of life cycle assessment. – 2014. – Т. 19. – С. 1146-1155.
288. Stone, G.C. Development of automatic, continuous partial discharge monitoring systems to detect motor and generator partial discharges / G.C. Stone, B.A. Lloyd, S.R. Campbell, H.G. Sedding – DOI 10.1109/IEMDC.1997.604065 // 1997 IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record. – IEEE, 1997. – С. MA2/3.1-MA2/3.3.
289. Sullivan, J.L. Life-cycle analysis results of geothermal systems in comparison to other power systems / J.L. Sullivan, C.E. Clark, J. Han, M. Wang – DOI 10.2172/993694 // Argonne National Lab. (ANL), Argonne, IL (United States), 2010. – №. ANL/ESD/10-5.
290. Sychev, Y. The assessment of the series active filter efficiency in power supply systems of oil production enterprises / Y. Sychev, R. Zimin, M. Aladin // E3S Web of Conferences, 2019, vol. 140, 04003.
291. Szabo, J. Infrastructures and state-building: Comparing the energy politics of the European Commission with the governments of Hungary and Poland / J. Szabo, M. Fabok – DOI 10.1016/j.enpol.2020.111253 // Energy Policy. – 2020. – Т. 138. – С. 111253. - URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421520300148>. (дата обращения: 03.03.2021).
292. Tao, F. Internet of Things in product life-cycle energy management / F. Tao, Y. Wang, Y. Zuo, H. Yang, M. Zhang – DOI 10.1016/j.jii.2016.03.001 // Journal of Industrial Information Integration. – 2016. – Т. 1. – С. 26-39.
293. Tao, F. New IT driven service-oriented smart manufacturing: framework and characteristics / F. Tao, Q. Qi – DOI 10.1109/TSMC.2017.2723764 // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. – 2017. – Т. 49. – №. 1. – С. 81-91. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7990538>. (дата обращения 26.02.2023)
294. Teerapittayanon, S. Distributed deep neural networks over the cloud, the edge and end devices / S. Teerapittayanon, B. McDanel, H.T. Kung – DOI

10.1109/ICDCS.2017.226//2017 IEEE 37th international conference on distributed computing systems (ICDCS). – IEEE, 2017. – С. 328-339.

295. Tenti, P. Distribution Loss Minimization by Token Ring Control of Power Electronic Interfaces in Residential Micro-Grids / P. Tenti, A. Costabeber, P. Mattavelli, D. Trombetti // IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, vol. 59, p. 3817-3826, ISSN: 0278-0046, doi: 10.1109/TIE.2011.2161653.

296. Thomson, W.T. Case Histories of Rotor Winding Fault Diagnosis in Induction Motors / W. T. Thomson, D. Rankin // 21st Int Conf. Proc. on Condition Monitoring. – University College Swansea. – 1987.

297. Thomson, W.T. Current signature analysis to detect induction motor faults / W.T. Thomson, M. Fenger // IEEE Industry Applications Magazine. – 2001. – Т. 7. – №. 4. – С. 26-34. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/930988>. (дата обращения: 20.09.2021).

298. Thornton, C. An investigation of the comparative behaviour of alternative contact force models during elastic collisions / C. Thornton, S.J. Cummins, P.W. Cleary – DOI 10.1016/j.powtec.2011.01.013 // Powder Technology. – 2011. – Т. 210. – №. 3. – С. 189-197.

299. Toliyat, H.A. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical machines, a review / H.A. Toliyat // IEEE-IAS 1999 Annual Meeting, Phoenix, AZ. – 1999. – С. 197-204. – URL: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1573950400609669120>. (дата обращения: 20.09.2021).

300. Ugwiri, M. A. Vibrations for fault detection in electric machines / M. A. Ugwiri, I. Mpia, A. Lay-Ekuakille – DOI: 10.1109/MIM.2020.8979527// IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. – 2020. – Т 23. – № 1. – С. 66-72.

301. Uhlemann, T.H.J. The digital twin: demonstrating the potential of real time data acquisition in production systems / T.H.J. Uhlemann, C. Schock, C. Lehmann, S. Freiberger, R. Steinhilper – DOI 10.1016/j.promfg.2017.04.043 // Procedia Manufacturing. – 2017. – Т. 9. – С. 113-120. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978917301610>. (дата обращения: 23.10.2023).

302. Unesco World Water Assessment Programme, UN-Water. Managing Water Under Uncertainty and Risk. – Unesco, 2012. – Т. 1. ISBN: 978-92-3-104235-5, 978-92-3-001045-4 (e-book). URL: <http://unesdoc.unesco.org/images/0021/002156/215644e.pdf>. (дата обращения: 17.09.2020).
303. Vathoopan, M. Modular Fault Ascription and Corrective Maintenance Using a Digital Twin: 16th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM 2018 / M. Vathoopan, M. Johny, A. Zoitl, A. Knoll – DOI 10.1016/j.ifacol.2018.08.470 // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – Т. 51. – № 11. – С. 1041-1046. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318315982> (дата обращения: 09.09.2023).
304. Vlasov, A.I. Smart management of technologies: predictive maintenance of industrial equipment using wireless sensor networks / A.I. Vlasov, P.V. Grigoriev, A.I. Krivoshein, V.A. Shakhnov, S.S. Filin, V.S. Migalin – DOI 10.9770/jesi.2018.6.2(2) // Entrepreneurship and Sustainability Issues. – 2018. – Т. 6. – № 2. – С. 489-502.
305. Wang, H.A Compound Fault Diagnosis for Rolling Bearings Method Based on Blind Source Separation and Ensemble Empirical Mode Decomposition – DOI 10.1371/journal.pone.0109166 / H. Wang, R. Li, G. Tang, H. Yuan, Q. Zhao, X. Cao // PLoS ONE. – 2014. – Т. 9. – № e109166
306. Wang, N. The impact of transportation infrastructure and industrial agglomeration on energy efficiency: Evidence from China's industrial sectors / N. Wang, Y. Zhu, T. Yang – DOI 10.1016/j.jclepro.2019.118708 // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Т. 244. – С. 118708. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619335784> (дата обращения: 20.11.2021).
307. Wang, Q. Does urbanization lead to less residential energy consumption? A comparative study of 136 countries / Q. Wang, J. Lin, K. Zhou, J. Fan, M.P. Kwan – DOI 10.1016/j.energy.2020.117765 // Energy. – 2020. – Т. 202. – С. 117765. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544220308720> (дата обращения: 14.10.2021).

308. Weikun, D. Physics-informed machine learning in prognostics and health management: state of the art and challenges / D.E.N.G. Weikun, K.T. Nguyen, K. Medjaher, G.O.G.U. Christian, J. Morio, – DOI 10.1016/j.apm.2023.07.011 // Applied Mathematical Modelling. – 2023. – Т. 124. – С. 325-352. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X23003086> (дата обращения: 19.10.2023).
309. Wensrich, C.M. A. Rolling friction as a technique for modelling particle shape in DEM / C.M. Wensrich, A. Katterfeld – DOI 10.1016/j.powtec.2011.10.057 // Powder Technology. – 2012. – Т. 217. – С. 409-417.
310. Wu, D. A fog computing-based framework for process monitoring and prognosis in cyber-manufacturing / D. Wu, S. Liu, L. Zhang, J. Terpenney, R.X. Gao, T. Kurfess, J.A. Guzzo – DOI 10.1016/j.jmsy.2017.02.011// Journal of Manufacturing Systems. – 2017. – Т. 43. – С. 25-34.
311. www.gartner.com. сайт Gartner: They fit into four main themes: emergent AI, developer experience, pervasive cloud, and human-centric security and privacy.: сайт. – URL: <https://www.gartner.com/en/articles/what-s-new-in-the-2023-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies> (дата обращения: 07.09.2023). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей. – Текст: электронный.
312. www.so-ups.ru. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2021 году. URL: https://www.soups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2022/ups_rep2021.pdf (Доступно 05.10.2023).
313. www.world-nuclear.org. сайт: How can nuclear combat climate change? URL: <https://www.world-nuclear.org/nuclear-essentials/how-can-nuclear-combat-climate-change.aspx> (Доступно 02.10.2023).
314. Xie, L. Does urbanization increase residential energy use? Evidence from the Chinese residential energy consumption survey 2012 / L. Xie, H. Yan, S. Zhang, C. Wei – DOI 10.1016/j.chieco.2019.101374 // China Economic Review. – 2020. – Т. 59. – С. 101374. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1043951X1930135X> (дата обращения: 04.06.2022).

315. Xu, L. Influence of particle shape on liner wear in tumbling mills: A DEM study / L. Xu, K. Luo, Y. Zhao, J. Fan, K. Cen – DOI 10.1016/j.powtec.2019.03.033 // Powder technology. – 2019. – Т. 350. – С. 26-35.
316. Yin, Y. Dynamic data mining of sensor data / Y. Yin, L. Long, X. Deng – DOI 10.1109/ACCESS.2020.2976699 // IEEE Access. – 2020. – Т. 8. – С. 41637-41648.
317. Zakoldaev, D.A. Application of imitation modelling means to create digital twins of the Industry 4.0 company technological equipment / D.A. Zakoldaev, A.V. Gurjanov, D.R. Kochubey, I.O. Zharinov – DOI 10.1088/1757-899X/450/3/032006 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Т. 450. – № 3. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/450/3/032006/meta> (дата обращения: 09.12.2018).
318. Zhang, P. A survey of condition monitoring and protection methods for medium-voltage induction motors / P. Zhang, Y. Du, T.G. Habetler, B. Lu // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2010. – Т. 47. – №. 1. – С. 34-46.
319. Zhong, Q.C. Synchronized and democratized smart grids to underpin the third industrial revolution / Q.C. Zhong – DOI 10.1016/j.ifacol.2017.08.699 // IFAC-PapersOnLine. – 2017. – Т. 50. – №. 1. – С. 3592-3597. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896317311400> (дата обращения: 04.09.2021).
320. Zhou, X. A novel anti-noise fault diagnosis approach for rolling bearings based on convolutional neural network fusing frequency domain feature matching algorithm / X. Zhou, S. Mao, M. Li – DOI 10.3390/s21165532 // Sensors. – 2021. – Т. 21. – №. 16. – С. 5532. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/16/5532> (дата обращения: 19.10.2023).
321. Zhuang, C. Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor / C. Zhuang, J. Liu, H. Xiong – DOI 10.1007/s00170-018-1617-6 // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – Т. 96. – № 1. – С. 1149-1163. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-018-1617-6#citeas> (дата обращения: 09.12.2018).

322. **Zhukovskiy, Y.** Automated system for definition of life-cycle resources of electromechanical equipment / **Y. Zhukovskiy**, N. Koteleva – DOI 10.1088/1757-899X/177/1/012014 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2017. – Т. 177. – №. 1. – С. 012014. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/177/1/012014/pdf>. (дата обращения: 19.10.2023).
323. **Zhukovskiy, Y.** Assessment of the Impact of Technological Development and Scenario Forecasting of the Sustainable Development of the Fuel and Energy Complex / **Y. Zhukovskiy**, A. Koshenkova, V. Vorobeva, D. Rasputin, R. Pozdnyakov – DOI 10.3390/en16073185 // Energies. – 2023. – Т. 16. – №. 7. – С. 3185.
324. **Zhukovskiy, Y.** Development of augmented reality system for servicing electromechanical equipment / **Y. Zhukovskiy**, N. Koteleva – DOI 10.1088/1742-6596/1015/4/042068 // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Т. 1015. – С. 042068.
325. **Zhukovskiy, Y.** Induction Motor Bearing Fault Diagnosis Based on Singular Value Decomposition of the Stator Current / **Y. Zhukovskiy**, A. Buldysko, I. Revin – DOI 10.3390/en16083303 // Energies. – 2023. – Т. 16. – №. 8. – С. 3303.
326. **Zhukovskiy, Y.** Method of Data storing, collection and aggregation for definition of life-cycle resources of electromechanical equipment / **Y. Zhukovskiy**, N. Koteleva – DOI 10.1088/1755-1315/87/3/032057 // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2017. – Т. 87. – №. 3. – С. 032057.
327. **Zhukovskiy, Y.** Scenario modeling of sustainable development of energy supply in the Arctic / **Y. Zhukovskiy**, P. Tsvetkov, A. Buldysko, Y. Malkova, A. Stoianova, A. Koshenkova – DOI 10.3390/resources10120124 // Resources. – 2021. – Т. 10. – №. 12. – С. 124.
328. **Zhukovskiy, Y.L.** A method of definition of life-cycle resources of electromechanical equipment. / **Y.L. Zhukovskiy**, N.I. Koteleva – DOI 10.1088/1757-899X/124/1/012172 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2016. – Т. 124. – №. 1. – С. 012172.

329. **Zhukovskiy, Y.L.** About increasing informativity of diagnostic system of asynchronous electric motor by extracting additional information from values of consumed current parameter / **Y.L. Zhukovskiy**, N.A. Korolev, N.I. Koteleva – DOI 10.1088/1742-6596/1015/3/032158// Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – T. 1015. – C. 032158.
330. **Zhukovskiy, Y.L.** Analysis of technological changes in integrated intelligent power supply systems / **Y.L. Zhukovskiy**, V.V. Starshaia, D.E. Batueva, A.D. Buldysko // Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects-11th Conference of the Russian-German Raw Materials. – Saint-Petersburg: Saint-Petersburg mining university, 2018. – T.1. – C. 249-258.
331. **Zhukovskiy, Y.L.** Blockchain-based digital platforms to reduce the carbon footprint of mining / **Y.L. Zhukovskiy**, A.V. Semenyuk, L.Z. Alieva, E.G. Arapova, // MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. – 2022. – T. 6. – C. 361-378.
332. **Zhukovskiy, Y.L.** Concept of Smart Cyberspace for Smart Grid Implementation. / **Y.L. Zhukovskiy**, D.A. Malov – DOI 10.1088/1742-6596/1015/4/042067// Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, 2018, Volume 1015, Issue 4, pp. 042067. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1015/4/042067/pdf>. (дата обращения: 30.10.2018).
333. **Zhukovskiy, Y.L.** Diagnostics and evaluation of the residual life of an induction motor according to energy parameters / **Y.L. Zhukovskiy**, N.I. Koteleva – DOI 10.1088/1742-6596/1050/1/012106 // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – T. 1050. – №. 1. – C. 012106.
334. **Zhukovskiy, Y.L.** Electrical equipment maintenance system with elements of augmented reality technology / **Y.L. Zhukovskiy**, N.I. Koteleva – DOI 10.1088/1757-899X/643/1/012024 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, 2019, Volume 643, Issue 1, pp. 012024. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/643/1/012024/pdf>. (дата обращения: 23.10.2023).
335. **Zhukovskiy, Y.L.** Energy demand side management in stand-alone power supply system with renewable energy sources / **Y.L. Zhukovskiy**, A.Y. Lavrik, A.D. Buldysko

– DOI 10.1088/1742-6596/1753/1/012059 // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 1753. – №. 1. – С. 012059.

336. **Zhukovskiy, Y.L.** Fossil energy in the framework of sustainable development: analysis of prospects and development of forecast scenarios / **Y.L. Zhukovskiy**, D.E. Batueva, A.D. Buldysko, B. Gil, V.V. Starshaia – DOI 10.3390/en14175268 // Energies. – 2021. – Т. 14. – №. 17. – С. 5268. - URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/17/5268>. (дата обращения: 25.08.2021).

337. **Zhukovskiy, Y.L.** Monitoring of grinding condition in drum mills based on resulting shaft torque / **Y.L. Zhukovskiy**, N.A. Korolev, Y.M. Malkova – DOI 10.31897/PMI.2022.91 // Записки Горного института. – 2022. – Т. 256. – С. 686-700.

338. **Zhukovskiy, Y.L.** Quality estimation of continuing professional education of technical specialists / **Y.L. Zhukovskiy**, B.U. Vasilev, N.I. Koteleva – DOI 10.1109/ITMQIS.2017.8085921 // 2017 International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies"(IT&QM&IS). – IEEE, 2017. – С. 704-707.

339. **Zhukovskiy, Y.L.** The development and use of diagnostic systems and estimation of residual life in industrial electrical equipment / **Y.L. Zhukovskiy**, B.U. Vasiliev // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, No. 20. – P. 41150-41155.

340. **Zhukovskiy, Y.L.** The probability estimate of the defects of the asynchronous motors based on the complex method of diagnostics / **Y.L. Zhukovskiy**, N.A. Korolev, I.S. Babanova, A.V. Boikov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2017. – Т. 87. – №. 3. – С. 032055.

341. **Zhukovskiy, Yu.L.** The prediction of the residual life of electromechanical equipment based on the artificial neural network / **Yu.L. Zhukovskiy**, N.A. Korolev, I.S. Babanova, A.V. Boikov – DOI 10.1088/1755-1315/87/3/032056 // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2017. – Т. 87. – №. 3. – С. 032056. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/87/3/032056/pdf>. (дата обращения: 23.10.2023).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Технологические блоки необходимые для перехода к интеллектуальной энергетике

Таблица А.1 – Технологии и ожидаемый эффект от применения в энергетике

№ п/п	Название технологии	Ожидаемый эффект от применения
Smart Grid technologies		
SG 1	Активно-адаптивные сети	Снижение потерь электроэнергии. Тарифное моделирование, планирование и управление. Увеличение адаптивности. Повышение информативности. Повышение уровня автоматизации.
SG 2	Микрогрид	Снижение потерь электроэнергии. Повышение доступности. Повышение энергобезопасности. Повышение экологичности. Появление новых субъектов рынка электроэнергии и мощности
SG 3	Demand response	Снижение дефицита/профицита мощности. Тарифное моделирование, планирование и управление. Повышение энергобезопасности. Стимулирование энергосбережения и повышения энергетической эффективности. Повышение экономичности
SG 4	Накопители	Снижение потерь электроэнергии. Тарифное моделирование, планирование и управление.
SG 5	Vehicle-to-grid, электромобили	Новые сервисы для потребителей. Тарифное моделирование, планирование и управление. Повышение экологичности. Появление новых субъектов рынка электроэнергии и мощности.
SG 6	Интеллектуальное силовое оборудование	Обновление инфраструктуры. Снижение SAIDI/SAIFI. Снижение рисков аварий. Повышение уровня автоматизации. Повышение качества электроэнергии.
SG 7	HVDC	Снижение потерь электроэнергии. Повышение качества электроэнергии. Снижение рисков аварий.
SG 8	Цифровая ПС	Повышение надежности. Увеличение скорости принятия решений. Повышение уровня наблюдаемости электросетевой инфраструктуры. Обновление инфраструктуры. Сокращение операционных затрат OPEX.
SG 9	Plug&play	Сокращение сроков технологического присоединения. Увеличение адаптивности.

Продолжение таблицы А.1

SG 10	СМЗУ, СМПП (WAMS/WAPS/WACS/WAMPAC)	Повышение информативности. Повышение уровня наблюдаемости электросетевой инфраструктуры. Снижение рисков аварий.
SG 11	Энергорouter	Повышение уровня наблюдаемости электросетевой инфраструктуры. Увеличение адаптивности. Снижение дефицита/профицита мощности. Появление новых субъектов рынка электроэнергетики и мощности.
SG 12	Гибкие управляемые передачи переменного тока FACTS	Снижение потерь электроэнергии. Сокращение издержек на текущую эксплуатацию оборудования. Снижение потребления материалов. Повышение качества электроэнергии.
SG 13	Power line communication	Увеличение скорости принятия решений. Повышение информативности.
IT technologies		
IT 1	IoT (IoE)	Увеличение скорости принятия решений. Новые сервисы для потребителей. Повышение информативности. Стимулирование энергосбережения и повышения энергетической эффективности.
IT 2	5G	Увеличение скорости принятия решений. Повышение качества и скорости оказания услуг. Повышение уровня автоматизации.
IT 3	Machine-to-machine	Повышение информативности. Повышение качества и скорости оказания услуг. Повышение уровня автоматизации. Увеличение адаптивности.
IT 4	Облачные решения (+ туманные вычисления)	Повышение экономичности. Повышение информативности. Ускорение контроля за бизнес процессами. Новые сервисы для потребителей.
IT 5	Big DATA (Большие данные)	Увеличение скорости принятия решений. Тарифное моделирование, планирование и управление. Повышение уровня наблюдаемости электросетевой инфраструктуры.
IT 6	Blokchain and Smart contract	Новые сервисы для потребителей. Ускорение закупочных процедур. Повышение качества и скорости оказания услуг. Прозрачность контроля за инвестициями. Появление новых субъектов рынка электроэнергетики и мощности.
IT 7	Кибербезопасность	Повышение энергобезопасности. Стимулирование инноваций. Новые бизнес модели. Обновление инфраструктуры. Обновление инфраструктуры.

Продолжение таблицы А.1

IT 8	AI-driven development	Увеличение скорости принятия решений. Новые сервисы для потребителей. Стимулирование инноваций. Новые бизнес модели. Повышение уровня автоматизации.
IT 9	Empowered edge	Увеличение скорости принятия решений. Новые сервисы для потребителей. Стимулирование инноваций. Повышение качества и скорости оказания услуг. Повышение информативности.
IT 10	Predictive management	Новые бизнес модели. Снижение рисков аварий. Повышение эффективности капитальных и операционных затрат (ОРЕХ/САРЕХ). Сокращение издержек на текущую эксплуатацию оборудования.
IT 11	Ethics&privacy	Новые бизнес модели. Новые сервисы для потребителей.
IT 12	Augmented analytics	Увеличение скорости принятия решений. Повышение уровня автоматизации. Повышение качества и скорости оказания услуг.
IT 13	PLM (технология управления жизненным циклом изделия)	Стимулирование инноваций. Повышение уровня наблюдаемости электросетевой инфраструктуры. Увеличение адаптивности. Повышение эффективности ОРЕХ/САРЕХ.
IT 14	Feed-in tariff	Стимулирование энергосбережения и повышения энергетической эффективности. Появление новых субъектов рынка электроэнергии и мощности. Повышение экологичности. Снижение вредных выбросов.
IT 15	Новые технологии обучения (VR, AR)	Стимулирование инноваций. Повышение информативности. Повышение доступности. Формирование кадров цифровой трансформации.
Digital technologies		
D 1	Новые производственные технологии	Повышение уровня автоматизации. Новые бизнес модели. Повышение эффективности ОРЕХ/САРЕХ. Обновление инфраструктуры.
D 2	Immersive technologies/Extended reality	Стимулирование инноваций. Повышение информативности. Повышение доступности. Формирование кадров цифровой трансформации.
D 3	Интеллектуальные датчики	Повышение информативности. Обновление инфраструктуры. Повышение уровня автоматизации. Снижение рисков аварий.

Продолжение таблицы А.1

D 4	Интеллектуальный учет, Умные счетчики	Тарифное моделирование, планирование и управление. Повышение информативности. Повышение уровня автоматизации. Автоматизация бизнес процессов. Повышение качества электроэнергии.
D 5	Цифровые двойники (digital models - DM, digital twins - DT, digital shadows - DS)	Стимулирование инноваций. Новые бизнес модели. Повышение информативности. Повышение эффективности OPEX/CAPEX. Увеличение скорости принятия решений.
D 6	Подключенный персонал (оцифрованные действия)	Снижение рисков аварий. Повышение уровня автоматизации. Повышение качества и скорости оказания услуг. Сокращение операционных затрат OPEX. Увеличение скорости принятия решений.
D 7	Autonomous things	Увеличение скорости принятия решений. Новые сервисы для потребителей. Снижение рисков. Снижение рисков аварий.
D 8	SCADA/DMS/OMS/ADMS	Повышение качества и скорости оказания услуг. Повышение уровня автоматизации. Повышение информативности.
D 9	Quantum computing	Увеличение скорости принятия решений. Стимулирование инноваций.
D 10	Виртуальный датчики	Сокращение издержек на текущую эксплуатацию оборудования.
D 11	Дроны, беспилотники	Повышение уровня наблюдаемости электросетевой инфраструктуры. Повышение качества и скорости оказания услуг.
D 12	BIM/CIM	Повышение экономической эффективности инвестиционно-строительных проектов. Повышение экономичности. Снижение рисков аварий.
D 13	DPS (Системы цифрового проектирования сетей)	Стимулирование инноваций. Повышение уровня наблюдаемости электросетевой инфраструктуры.
D 14	Smart spaces (умные/высокотехнологичные пространства, напр. smart city)	Появление новых субъектов рынка электроэнергетики и мощности. Повышение уровня наблюдаемости электросетевой инфраструктуры. Увеличение адаптивности
D 15	Machine learning, neural network	Стимулирование инноваций. Формирование кадров цифровой трансформации. Повышение информативности.

Продолжение таблицы А.1

D 16	Агрегаторы нагрузки	Тарифное моделирование, планирование и управление. Новые сервисы для потребителей. Появление новых субъектов рынка электроэнергии и мощности.
D 17	Energy Harvesting	Стимулирование энергосбережения и повышения энергетической эффективности. Повышение экономичности. Повышение экологичности. Снижение потребления материалов. Повышение уровня автоматизации.

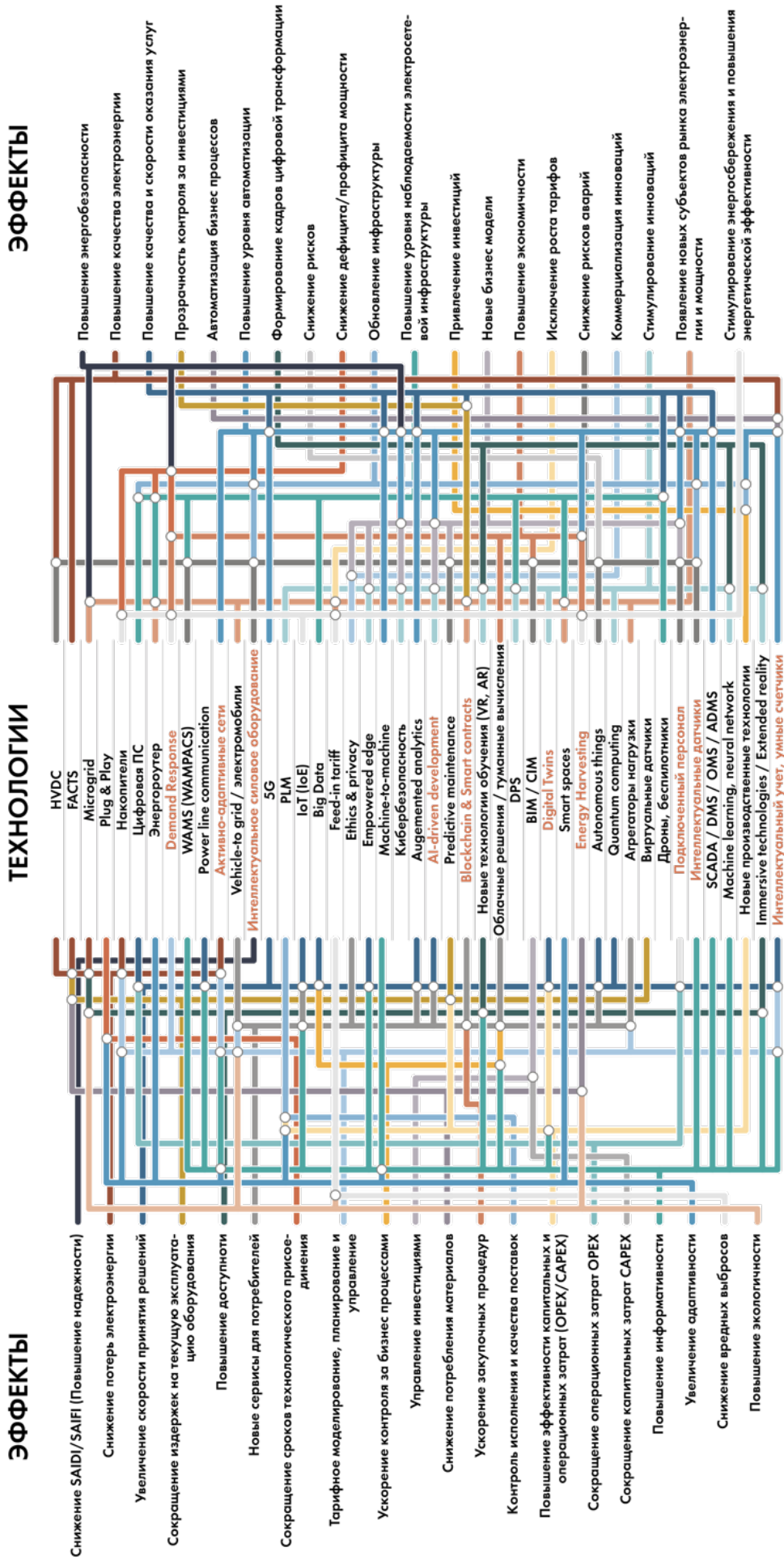


Рисунок А.1 – Технологии и ожидаемый эффект от применения в энергетике

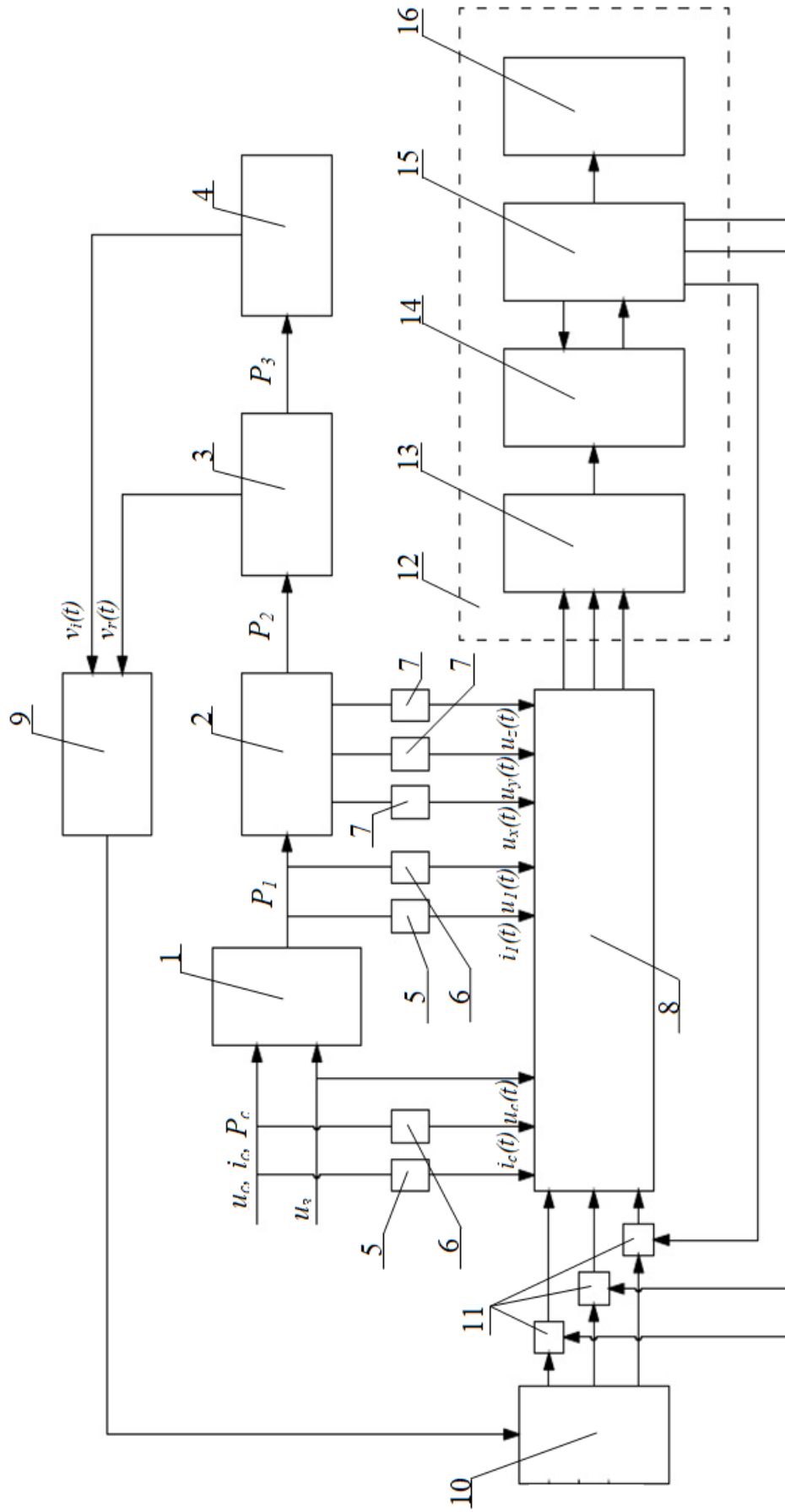


Рисунок А.2 – Структурная схема устройства диагностики технического состояния и оценки остаточного ресурса электромеханического агрегата с асинхронным двигателем: 1 – статический силовой преобразователь; 2 – электродвигатель; 3 – механический преобразователь; 4 – исполнительный орган; 5 – датчики тока на клеммах преобразователя и двигателя в фазах А, В, С; 6 – датчики напряжения на клеммах преобразователя и двигателя в фазах А, В, С; 7 – датчики вибрации на корпусе ЭД; 8 – плата сбора данных; 9 – система автоматизации технологического процесса; 10 – блок преобразования данных; 11 – ключи каналов связи между выходами блока преобразования данных и входами платы сбора данных; 12 – портовый компьютер; 13 – программный фильтр высоких и низких частот; 14 – постоянное запоминающее устройство; 15 – искусственная нейронная сеть; 16 – блок

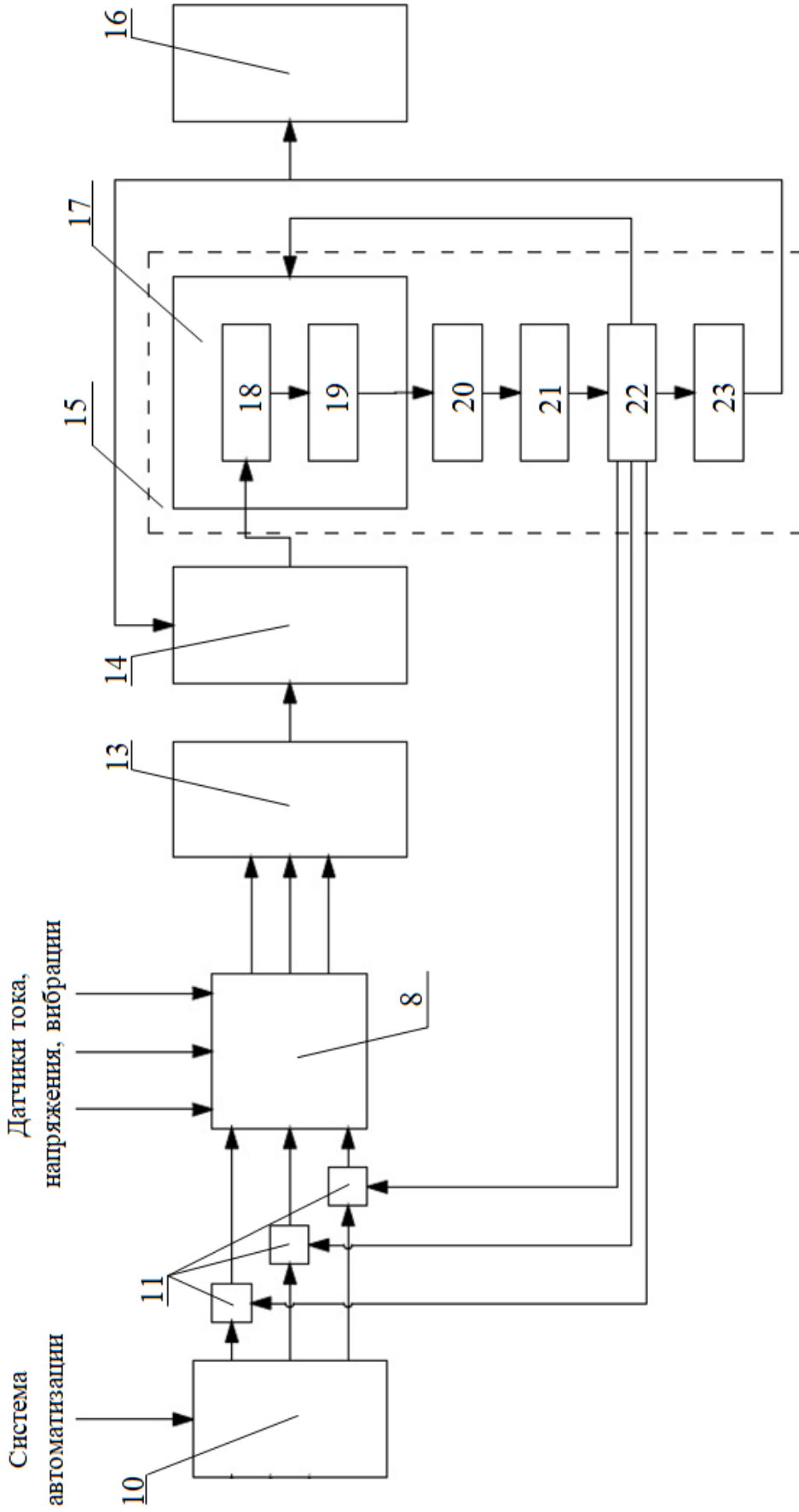


Рисунок А.3 – Структурная схема системы прогнозирования оценки вероятности безотказной работы по диагностируемым электрическим и вибрационным параметрам АД с использованием ИНС 17 – вход для настройки ИНС; 18 – блок формирования обучающих данных;

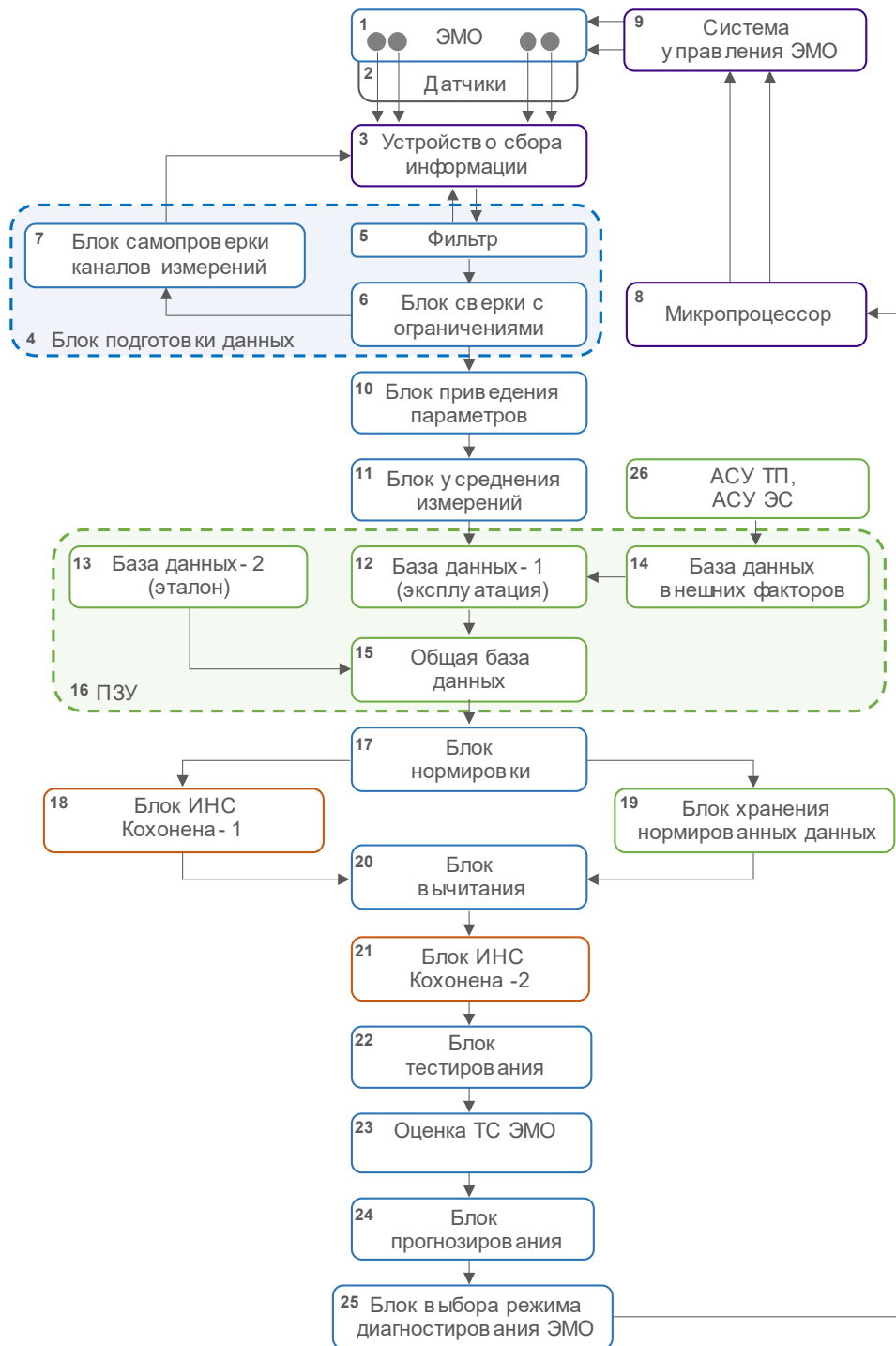


Рисунок А.4 – Структурная схема управления режимами на основе нейросетевого диагностирования неисправностей и технического состояния электромеханического оборудования: 1 – электромеханическое оборудование (ЭМО); 2 – датчики контролируемых параметров; 3 – устройство сбора информации; 4 – блок подготовки данных; 5 – фильтр; 6 – блок сверки с ограничениями; 7 – блок самопроверки каналов измерений; 8 – микропроцессор; 9 – система управления ЭМО; 10 – блок приведения параметров; 11 – блок усреднения измерений; 12 – база данных-1; 13 – база данных-2; 14 – база данных внешних факторов; 15 – общая база данных; 16 – постоянное запоминающее устройство (ПЗУ); 17 – блок нормировки; 18 – блок ИНС Кохонена-1; 19 – блок хранения нормированных данных ЭМО; 20 – блок вычитания; 21 – блок ИНС Кохонена-2; 22 – блок тестирования; 23 – оценка технического состояния; 24 – блок прогнозирования; 25 – блок выбора режима диагностирования ЭМО

Таблица А.2 – Определение значений вероятности дефекта ЭД по электрическим и вибрационным параметрам на разных стадиях его работы

Дефекты	m_i	h_i	Вероятности				
	$i:$	$i:$	Нормальное состояние	Предкризисное состояние	Кризисное состояние	По паспортным данным	Фактическое состояние
1	2	3	4	5	6	7	8
Повреждение изоляции обмотки относительно корпуса	1		0,12	0,2	0,28	0,1	0,18
Повреждение межфазной изоляции	2		0,12	0,2	0,28	0,1	0,16
Межвитковые замыкания	3		0,1	0,18	0,26	0,09	0,3
Дефект обмотки статора	4	1	0,12	0,2	0,28	0,1	0,14
Короткие замыкания в обмотке статора	5		0,12	0,2	0,28	0,1	0,12
Дефект обмотки ротора	6	2	0,08	0,16	0,24	0,08	0,14
Повреждения подшипника		3	0,1	0,18	0,26	0,09	0,17
Повреждения ротора		4	0,12	0,2	0,28	0,1	0,16
Повреждение магнитопровода ротора	7		0,12	0,2	0,28	0,1	0,14
Повреждение магнитопровода статора	8		0,2	0,28	0,36	0,14	0,2
Динамический эксцентриситет	9	5	0,12	0,2	0,28	0,1	0,3
Статический эксцентриситет	10	6	0,12	0,2	0,28	0,1	0,3
Несимметрия питающего напряжения нулевой последовательности	11		0,1	0,18	0,26	0,09	0,14
Несимметрия питающего напряжения обратной последовательности	12		0,1	0,18	0,26	0,09	0,17
Несинусоидальность питающего напряжения	13		0,12	0,2	0,28	0,1	0,14
Дефект контактных соединений		7	0,12	0,2	0,28	0,1	0,16
Небаланс масс ротора		8	0,2	0,28	0,36	0,14	0,18
Механические ослабления		9	0,12	0,2	0,28	0,1	0,22
Дефект редуктора		10	0,12	0,2	0,28	0,1	0,15
Расцентровка валов		11	0,1	0,18	0,26	0,09	0,14

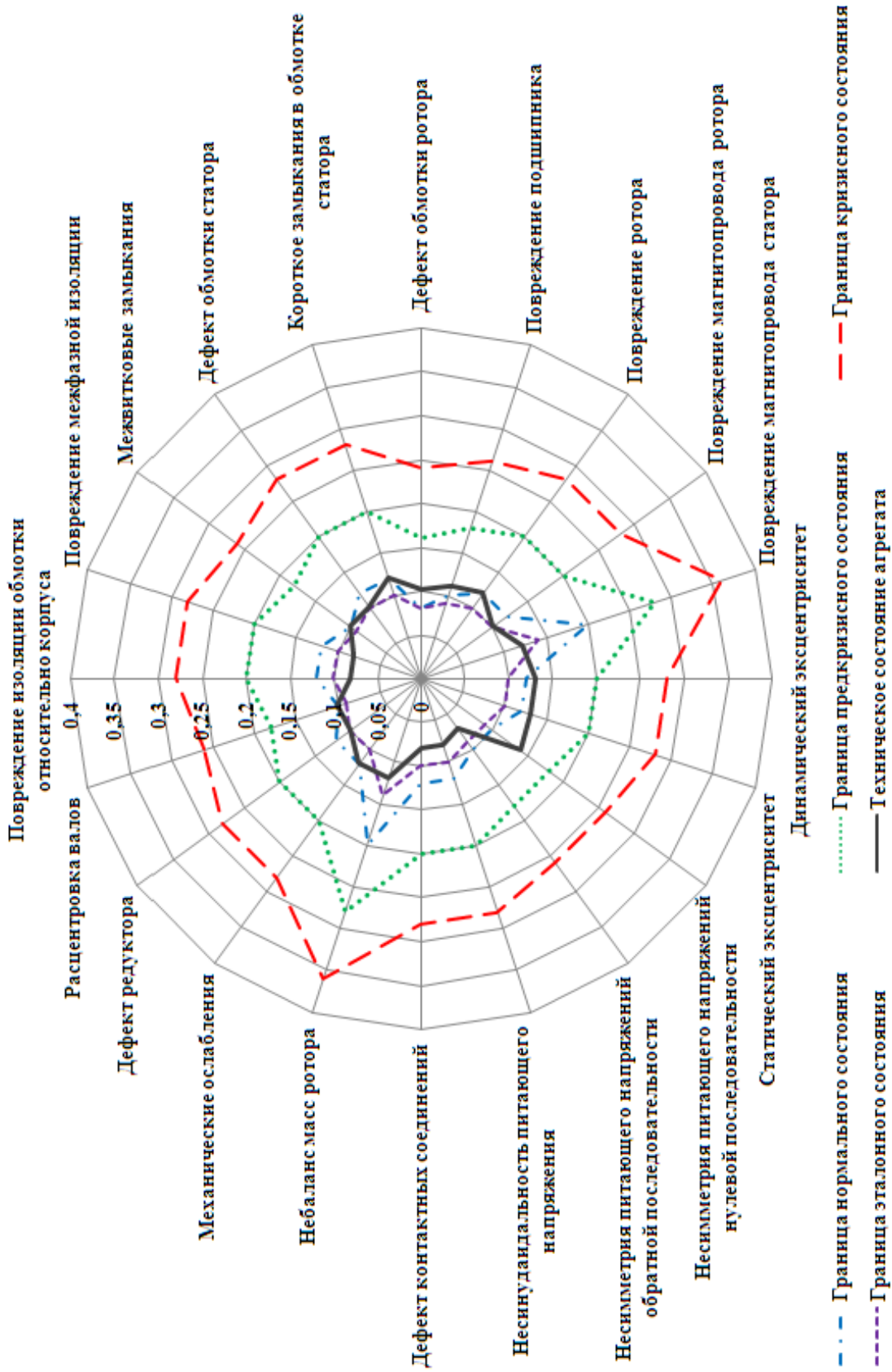


Рисунок А.5 – Диаграмма вероятностного технического состояния: нормальное состояние агрегата

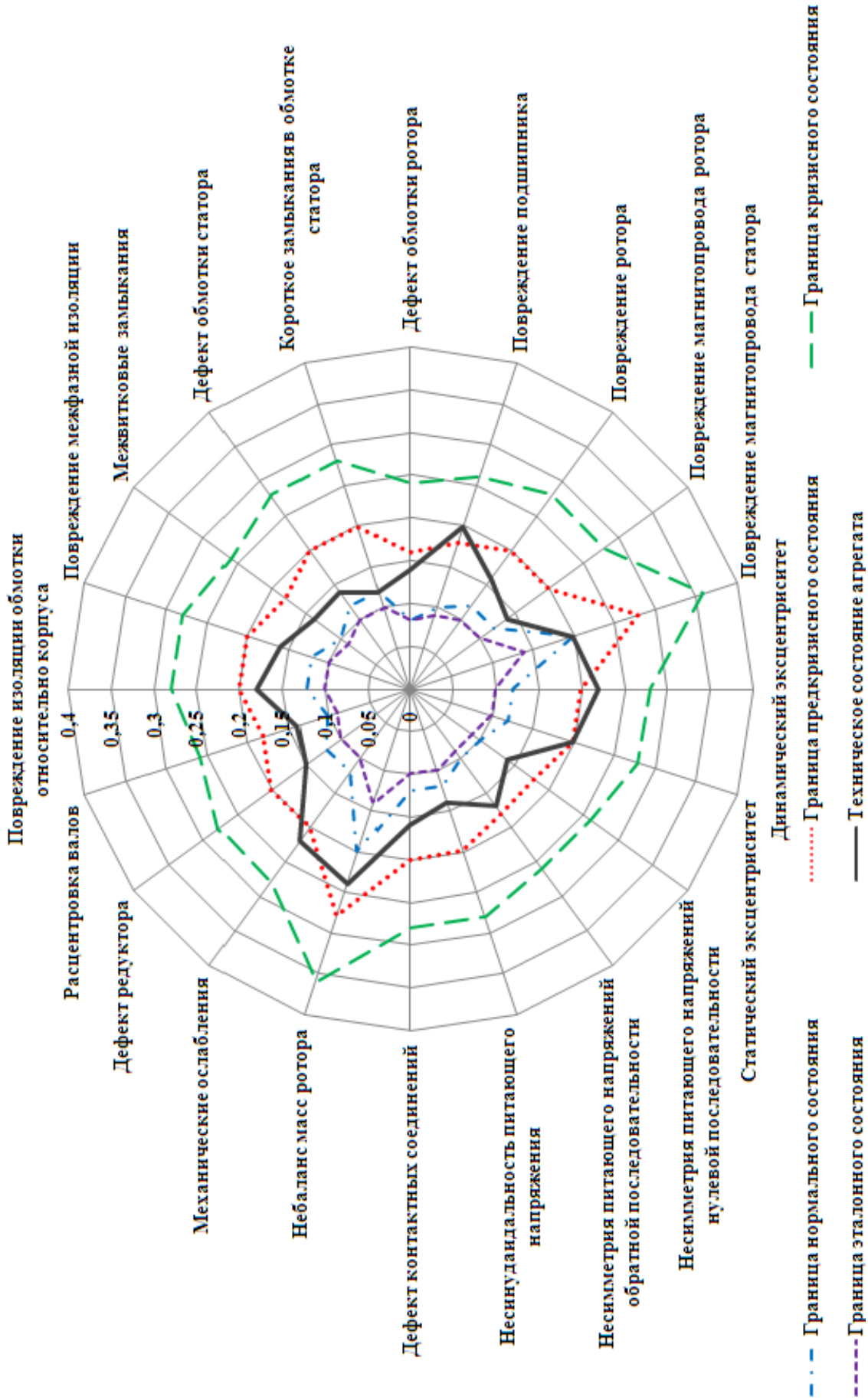


Рисунок А.6 – Диаграмма вероятностного технического состояния: предкризисное состояние агрегата

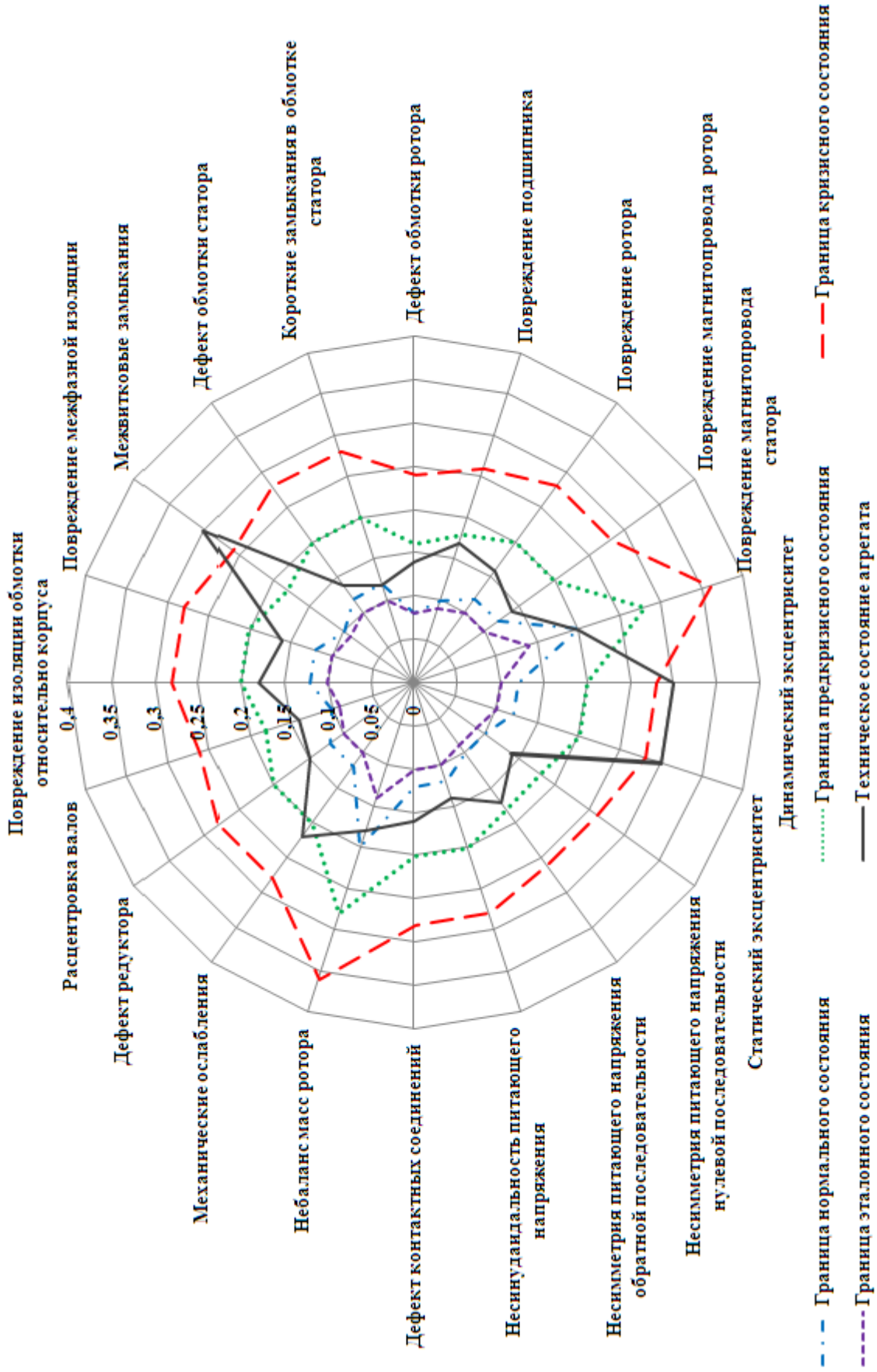


Рисунок А.7 – Диаграмма вероятностного технического состояния: кризисное состояние агрегата

Таблица А.3 – Сравнение полученных результатов расчёта вклада компонент

№ п/п	Относительный вклад, %			Совокупный вклад, %		
	Нормальное состояние	1 раковина	3 раковины	Нормальное состояние	1 раковина	3 раковины
Фаза А						
0	54,588734	56,928886	52,862365	54,588734	56,928886	52,862365
1	45,365214	43,030047	46,825041	99,953948	99,958933	99,687407
2	0,005713	0,006323	0,259554	99,959661	99,965256	99,946961
3	0,005507	0,002725	0,006455	99,965169	99,96798	99,953416
4	0,003133	0,002691	0,006271	99,968302	99,970671	99,959687
5	0,002687	0,00214	0,005474	99,970989	99,972811	99,965161
6	0,002667	0,002054	0,002385	99,973656	99,974865	99,967546
7	0,002657	0,001333	0,002383	99,976313	99,976197	99,969928
8	0,00263	0,001311	0,002319	99,978943	99,977508	99,972247
9	0,001364	0,001263	0,002208	99,980308	99,978772	99,974456
10	0,001339	0,00125	0,001797	99,981646	99,980022	99,976253
11	0,001077	0,001114	0,001792	99,982723	99,981136	99,978045
Фаза В						
0	53,291363	54,165786	56,725008	53,291363	54,165786	56,725008
1	46,668971	45,80813	43,042536	99,960334	99,973915	99,767544
2	0,004136	0,002663	0,196508	99,96447	99,976578	99,964052
3	0,004097	0,002637	0,004419	99,968566	99,979215	99,96847
4	0,002899	0,001347	0,004193	99,971465	99,980562	99,972664
5	0,002669	0,001284	0,002074	99,974134	99,981845	99,974738
6	0,002222	0,001078	0,001842	99,976355	99,982923	99,97658
7	0,002109	0,001074	0,00183	99,978464	99,983998	99,97841
8	0,002087	0,00073	0,001431	99,980551	99,984728	99,979841
9	0,001834	0,000696	0,001348	99,982385	99,985424	99,981189
10	0,001823	0,00068	0,001343	99,984208	99,986104	99,982533
11	0,000956	0,000639	0,001333	99,985164	99,986743	99,983865
Фаза С						
0	56,876428	53,698498	54,712877	56,876428	53,698498	54,712877
1	43,059692	46,248323	45,048668	99,936119	99,946822	99,761545
2	0,023789	0,021773	0,171188	99,959908	99,968595	99,932733
3	0,00614	0,00317	0,024359	99,966048	99,971764	99,957092
4	0,005854	0,003154	0,008227	99,971903	99,974919	99,965319
5	0,002469	0,001771	0,00797	99,974372	99,97669	99,973289
6	0,00245	0,001725	0,002551	99,976822	99,978414	99,97584
7	0,002245	0,001343	0,002525	99,979067	99,979757	99,978365
8	0,002236	0,001341	0,00143	99,981303	99,981098	99,979795
9	0,001323	0,001026	0,001423	99,982626	99,982125	99,981218
10	0,001185	0,001019	0,001344	99,983811	99,983144	99,982562
11	0,001128	0,000945	0,001319	99,984939	99,984089	99,983881

Таблица А.4 – Сравнение полученных результатов группировки компонент

	Визуальная группировка	Скаттерограммы	W-корреляционная матрица, порог = 0,8	W-корреляционная матрица, порог = 0,9
Без дефектов				
I_a	Trend: [0, 1] Group 1: [2, 3] Group 2: [4] Group 3: [9, 10, 11] Noise: [5, 6, 7, 8]	Trend: [0, 1] Group 1: [2, 3] Group 2: [4] Group 3: [5, 6, 7, 8] Group 4: [9, 10, 11]	Trend: [0, 1] Group 1: [2, 3] Group 2: [4] Group 3: [5, 6, 7, 8] Group 4: [9, 10, 11]	Trend: [0, 1, 9, 10, 11] Group 1: [2, 3, 5, 6, 7, 8] Group 2: [4]
I_b	Trend: [0, 1] Group 1: [2, 3] Group 2: [4, 5] Group 3: [6] Noise: [7, 8, 9, 10, 11]	Trend: [0, 1] Group 1: [2, 3] Group 2: [4, 5] Group 3: [6] Group 4: [7, 8] Group 5: [9, 10] Group 6: [11]	Trend: [0, 1] Group 1: [2, 3] Group 2: [4, 5] Group 3: [6] Group 4: [7, 8] Group 5: [9, 10] Group 6: [11]	Trend: [0, 1, 2, 3, 7, 8] Group 1: [4, 5, 9, 10, 11] Group 2: [6]
I_c	Trend: [0, 1] Group 1: [2, 9] Group 2: [3, 4] Group 3: [10, 11] Noise: [5, 6, 7, 8]	Trend: [0, 1] Group 1: [2] Group 2: [3, 4] Group 3: [5, 6] Group 4: [7, 8] Group 5: [9, 10, 11]	Trend: [0, 1] Group 1: [2] Group 2: [3, 4] Group 3: [5, 6] Group 4: [7, 8] Group 5: [9, 10, 11]	Trend: [0, 1] Group 1: [2] Group 2: [3, 4, 5, 6, 9, 10, 11] Group 3: [7, 8]
1 раковина				
I_a	Trend: [0, 1] Group 1: [2] Group 2: [5, 6] Group 3: [7, 8, 11] Noise: [3, 4, 9, 10]	Trend: [0, 1] Group 1: [2] Group 2: [3, 4] Group 3: [5, 6] Group 4: [9, 10] Group 5: [7, 8, 11]	Trend: [0, 1] Group 1: [2] Group 2: [3, 4] Group 3: [5, 6] Group 4: [7, 8, 11] Group 5: [9, 10]	Trend: [0, 1] Group 1: [2] Group 2: [3, 4, 7, 8, 11] Group 3: [5, 6, 9, 10]
I_b	Trend: [0, 1] Group 1: [4, 5] Group 2: [8, 11] Group 3: [9, 10] Noise: [2, 3, 6, 7]	Trend: [0, 1] Group 1: [2, 3] Group 2: [4, 5] Group 3: [6, 7] Group 4: [8, 9, 10, 11]	Trend: [0, 1] Group 1: [2, 3, 8, 9, 10, 11] Group 2: [4, 5] Group 3: [6, 7]	Trend: [0, 1, 4, 5] Group 1: [2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 11]
I_c	Trend: [0, 1, 7] Group 1: [2, 3] Group 2: [4, 5] Group 3: [6, 8] Noise: [9, 10, 11]	Trend: [0, 1] Group 1: [2] Group 2: [3, 4] Group 3: [5, 6, 7, 8] Group 4: [9, 10] Group 5: [11]	Trend: [0, 1] Group 1: [2] Group 2: [3, 4] Group 3: [5, 6, 7, 8] Group 4: [9, 10] Group 5: [11]	Trend: [0, 1, 11] Group 1: [2, 5, 6, 7, 8] Group 2: [3, 4] Group 3: [9, 10]

Продолжение таблицы А.4

3 раковины				
I_a	Trend: [0, 1] Group 1: [2] Group 2: [3, 4, 8, 9] Group 3: [5] Noise: [6, 7, 10, 11]	Trend: [0, 1] Group 1: [2] Group 2: [3, 4, 5] Group 3: [6, 7] Group 4: [8, 9] Group 5: [10, 11]	Trend: [0, 1] Group 1: [2] Group 2: [3, 4, 5] Group 3: [6, 7, 8, 9] Group 4: [10, 11]	Trend: [0, 1, 6, 7, 8, 9] Group 1: [2] Group 2: [3, 4, 5, 10, 11]
I_b	Trend: [0, 1] Group 1: [2] Group 2: [3, 4, 8, 11] Group 3: [5] Noise: [6, 7, 9, 10]	Trend: [0, 1] Group 1: [2] Group 2: [3, 4] Group 3: [5] Group 4: [6, 7] Group 5: [8] Group 6: [9, 10] Group 7: [11]	Trend: [0, 1] Group 1: [2] Group 2: [3, 4] Group 3: [5] Group 4: [6, 7] Group 5: [8, 11] Group 6: [9, 10]	Trend: [0, 1, 3, 4, 8, 11] Group 1: [2] Group 2: [5] Group 3: [6, 7, 9, 10]
I_c	Trend: [0, 1] Group 1: [2] Group 2: [3] Group 3: [4, 5, 10, 11] Noise: [6, 7, 8, 9]	Trend: [0, 1] Group 1: [2] Group 2: [3] Group 3: [4, 5] Group 4: [6, 7] Group 5: [8, 9] Group 6: [10, 11]	Trend: [0, 1] Group 1: [2] Group 2: [3] Group 3: [4, 5] Group 4: [6, 7] Group 5: [8, 9] Group 6: [10, 11]	Trend: [0, 1, 10, 11] Group 1: [2] Group 2: [3] Group 3: [4, 5, 6, 7, 8, 9]

Таблица А.5 – Показатели надежности и энергоэффективности для анализа и предиктивного управления интеллектуальными сервисами «цифрового двойника»

Название показателя	Формула	Подсистема
КПД элементов установок электроцентробежных насосов и предвключенных устройств	$\eta = \frac{\rho g H(Q) + \Delta P \cdot Q}{N_{in}(Q)}$ <p>где N_{in} – мощность, потребляемая насосом; Q – подача; H – напор, создаваемый насосом; ρ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения; ΔP – заданное избыточное давление, создаваемое на устье скважины</p>	Электромеханика / надежность
КПД погружных электродвигателей	$\eta_{\text{пэд}} = \frac{N_{2M}}{N_{2M} + \Delta N_{\text{lost}}(N_{2M})}$ <p>где N_{2M} – мощность на валу двигателя; ΔN_{lost} – суммарные потери в двигателе</p>	Электромеханика / надежность
КПД станции управления	КПД станции управления определяется производителями как постоянная величина, указанная для номинального режима работы станции	Электромеханика
КПД трансформатора	<p>Потери в трансформаторе характеризуют КПД трансформатора, равный отношению мощности, передаваемой из трансформатора в кабельную линию N_{1K}, к мощности, поступающей на его первичную обмотку $N_{1K} + N_T$:</p> $\eta_T = \frac{N_{1K}}{N_{1K} + \Delta N_T} = \frac{N_{1K}}{N_{1K} + N_{\text{ХХ}} \left(\frac{U_{\text{ном}} + \Delta U_{\text{к}}(N_{1M})}{U_{2H}} \right)^2 + N_{\text{КЗ}} \left(\frac{I_M(N_{1M}) U_{2H}}{I_{1H} U_{1H}} \right)^2}$ <p>где ΔN_T – мощность, теряемая в трансформаторе; N_{1K} – мощность, потребляемая на входе кабеля; $N_{\text{ХХ}}$ – потери холостого хода трансформатора; $N_{\text{КЗ}}$ – потери трансформатора в опыте короткого замыкания; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение двигателя; $\Delta U_{\text{к}}$ – падение напряжения на кабеле; U_{2H} – напряжение отпайки; I_M – ток, потребляемый двигателем; I_{1H}, U_{1H} – номинальные ток и напряжение в первичной обмотке</p>	Электромеханика / надежность

Продолжение таблицы А.5

КПД кабеля	<p>При определении КПД кабеля полезной является мощность, поступающая на вход ПЭД, т. е. $N_{1M} = N_{2M} + \Delta N_{lost}$ КПД кабеля:</p> $\eta_T = \frac{N_{1M}}{N_{1M} + \Delta N_k} = \frac{N_{1M}}{N_{1M} + n_c I_M^2 (N_{1M}) \cdot \frac{\rho \cdot l_k}{s_k} (1 + \alpha_T (T_K - T_0))}$ <p>где ρ – удельное сопротивление меди при температуре $T_0 = 20^\circ\text{C}$, составляет $0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$; l_k – длина кабеля, м; s_k – площадь сечения жилы кабельной линии, мм^2; α_T – температурный коэффициент сопротивления меди, равный $0,004 \text{ 1}/^\circ\text{C}$; T_K – абсолютное значение температуры жилы, $^\circ\text{C}$; n_c – число жил кабеля, обычно равняется трем; I_M – ток, потребляемый двигателем (зависимость от потребляемой мощности обычно приводится производителем)</p>	Электромеханика / надежность
T_0	Наработка между отказами, ч	Электромеханика / надежность
T_B	Время восстановления, ч	Электромеханика / надежность
K_T	<p>Коэффициент готовности</p> $K_T = T_0 / (T_0 + T_B)$	Электромеханика / надежность
Удельный показатель электроэнергии на т добычи, кВт·ч/т (объемное удельное энергопотребления установки ШГН)	$W_{уд об} = \frac{W}{Q_{ч} \cdot T}$ <p>где W – энергия, потребляемая из сети, кВт·ч; T – время, ч; $W_{уд об}$ – объемный удельный расход электроэнергии, кВт·ч/м³; $Q_{ч}$ – часовой объемный дебит по жидкости, м³/ч</p>	Энергоэффективность
Удельный показатель электроэнергии на т добычи, кВт·ч/т (массовое удельное энергопотребления установки ШГН)	$W_{уд м} = \frac{W}{Q_{ч}' \cdot T}$ <p>где $W_{уд м}$ – массовый удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т; $Q_{ч}'$ – часовой массовый дебит по нефти, т/ч</p>	Энергоэффективность

Продолжение таблицы А.5

Удельный показатель электроэнергии на т добычи, кВт·ч/т (нормативное)	$W_{уд м}^{норм} = \frac{W}{Q'_ч \cdot T},$ <p>где $W_{уд м}$ – массовый удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т; $Q'_ч$ – часовой массовый дебит по нефти, т/ч</p>	Энергоэффективность
Удельный показатель электроэнергии на т добычи, кВт·ч/т (Стратегия развития компании)	$W_{уд min}^{Стр} = \frac{W}{Q'_ч \cdot T},$ <p>где $W_{уд min}^{Стр}$ – массовый удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т, утвержденный Стратегией компании (минимум); $Q'_ч$ – часовой массовый дебит по нефти, т/ч</p>	Энергоэффективность
Удельный показатель электроэнергии на т добычи, кВт·ч/т (Стратегия развития компании)	$W_{уд max}^{Стр} = \frac{W}{Q'_ч \cdot T},$ <p>где $W_{уд max}^{Стр}$ – массовый удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т, утвержденный Стратегией компании (максимум); $Q'_ч$ – часовой массовый дебит по нефти, т/ч</p>	Энергоэффективность

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2425390

**СПОСОБ ДИАГНОСТИКИ И ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО
РЕСУРСА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Патентообладатель(ли): *Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский
государственный горный институт имени Г.В. Плеханова
(технический университет)" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2009142097

Приоритет изобретения 16 ноября 2009 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений Российской Федерации 27 июля 2011 г.

Срок действия патента истекает 16 ноября 2029 г.



*Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам*

Б.И. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(19) RU (11) 2 425 390 (13) C1

(51) МПК
G01R 31/34 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: не действует (последнее изменение статуса: 02.07.2021)
Пошлина: учтена за 4 год с 17.11.2012 по 16.11.2013. Возможность восстановления: нет.

(21)(22) Заявка: 2009142097/28, 16.11.2009(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
16.11.2009

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 16.11.2009

(45) Опубликовано: 27.07.2011 Бюл. № 21(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 2300116 С2, 27.05.2007. JP
2002272195 А, 20.09.2002. US 4684858 А,
04.08.1987. JP 11196598 А, 21.07.1999.

Адрес для переписки:

199106, Санкт-Петербург, В.О., 21 линия, 2,
СПГИ (ГУ), отдел интеллектуальной
собственности и трансфера технологий
(отдел ИС и ТТ), А.П.Яковлеву

(72) Автор(ы):

Козярук Анатолий Ефтихевич (RU),
Жуковский Юрий Леонидович (RU),
Бабурин Сергей Васильевич (RU),
Коржев Александр Александрович (RU),
Васильева Елена Егоровна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

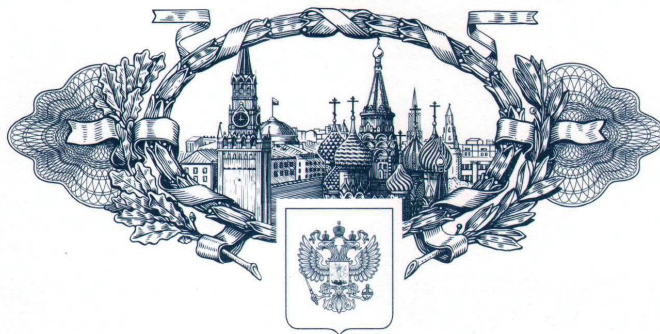
Государственное образовательное
учреждение высшего профессионального
образования "Санкт-Петербургский
государственный горный институт имени
Г.В. Плеханова (технический
университет)" (RU)

(54) СПОСОБ ДИАГНОСТИКИ И ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

(57) Реферат:

Изобретение относится к диагностике технического состояния силового электрооборудования. Способ диагностики технического состояния силового электрооборудования включает запись зависимостей от времени напряжения и тока, потребляемых электродвигателем, выполняемую с помощью датчиков напряжения и тока с последующим пропусканием через фильтр низких частот. Производят вычисление мгновенных мощностей каждой фазы. Далее выполняют спектральный анализ полученных сигналов напряжения, тока и мощности. Затем рассчитывают коэффициенты несимметрии, гармоник, потерь мощности. На основе этих коэффициентов и с учетом задания выходной координаты определяют техническое состояние электропривода и оценивают остаточный ресурс. Технический результат - повышение эффективности обнаружении неисправности на ранней стадии возникновения, что позволяет планировать рациональные сроки проведения ремонтов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2425391

**СПОСОБ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО
СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПО ЕГО
ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ**

Патентообладатель(ли): *Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский
государственный горный институт имени Г.В. Плеханова
(технический университет)" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2009142082

Приоритет изобретения 16 ноября 2009 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений Российской Федерации 27 июля 2011 г.

Срок действия патента истекает 16 ноября 2029 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам



Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(19) RU⁽¹¹⁾ 2 425 391 ⁽¹³⁾ C1

(51) МПК
G01R 31/34 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: не действует (последнее изменение статуса: 02.07.2021)
Пошлина: учтена за 3 год с 17.11.2011 по 16.11.2012. Возможность восстановления: нет.

(21)(22) Заявка: 2009142082/28, 16.11.2009(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
16.11.2009

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 16.11.2009

(45) Опубликовано: 27.07.2011 Бюл. № 21

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 2300116 C2, 27.06.2007. RU
2339049 C1, 20.11.2008. RU 2209442 C2,
20.09.2007. RU 2306538 C1, 20.09.2007. US
6507797 B1, 14.01.2003. US 5629870 A,
13.05.1997. JP 200184658 A, 30.06.2000.

Адрес для переписки:

199106, Санкт-Петербург, В.О., 21 линия, 2,
СПГТИ (ТУ), отдел интеллектуальной
собственности и трансфера технологий
(отдел ИС и ТТ)

(72) Автор(ы):

Козярук Анатолий Ефтихевич (RU),
Жуковский Юрий Леонидович (RU),
Черемушкина Маргарита Сергеевна (RU),
Коржев Александр Александрович (RU),
Кривенко Александр Владимирович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Государственное образовательное
учреждение высшего профессионального
образования "Санкт-Петербургский
государственный горный институт имени
Г.В. Плеханова (технический
университет)" (RU)

(54) СПОСОБ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПО ЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ

(57) Реферат:

Изобретение относится к области диагностики технического состояния электродвигателей, например приводных двигателей горно-транспортных машин, приводных двигателей скважинных погружных насосов. Сущность: в трех фазах электродвигателя производят непрерывное измерение питающего напряжения и фазного тока. По сигналам мгновенных значений тока и напряжения производят непрерывное вычисление мгновенных значений потребляемых мощностей. Рассчитывают значение средней мощности за период, производят построение спектрограмм потребляемых мощностей. Производят расчет величины потерь энергии в двигателе на каждой из частот спектра. Оценку технического состояния двигателя осуществляют путем сравнения полученных спектрограмм потерь с аналогичными спектрограммами, полученными на заведомо исправном двигателе. Технический результат: повышение точности и достоверности диагностирования поврежденных элементов электропривода за счет учета влияния нагрузки диагностируемого двигателя, носящей случайный характер.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2532762

**СПОСОБ ДИАГНОСТИКИ И ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО
РЕСУРСА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Патентообладатель(ли): *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный минерально-сырьевой университет "Горный" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2013135607

Приоритет изобретения **29 июля 2013 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **11 сентября 2014 г.**

Срок действия патента истекает **29 июля 2033 г.**

Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU**⁽¹¹⁾ **2 532 762**⁽¹³⁾ **C1**(51) МПК
G01R 31/34 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2013135607/28, 29.07.2013

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
29.07.2013

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 29.07.2013

(45) Опубликовано: 10.11.2014 Бюл. № 31

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 2425390 C1 27.07.2011. RU 2431152
C2 10.10.2011. RU 2213270 C2 27.09.2003. US
4536686 A 20.08.1985. US 4533862 A 06.08.1985

Адрес для переписки:

199106, Санкт-Петербург, В.О., 21 линия, 2,
ФГБОУ ВПО "Национальный минерально-
сырьевой университет "Горный", отдел ИС и
ТТ

(72) Автор(ы):

Жуковский Юрий Леонидович (RU),
Таранов Сергей Игоревич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Национальный минерально-сырьевой
университет "Горный" (RU)

(54) СПОСОБ ДИАГНОСТИКИ И ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

(57) Реферат:

Изобретение относится к диагностике технического состояния силового электрооборудования. Осуществляют запись зависимостей от времени напряжения и тока, потребляемых электродвигателем, выполняемую с помощью датчиков напряжения. Обрабатывают сигналы фильтром низких частот. Определяют расхождение амплитуд сигналов токов, напряжений и мощности каждой фазы. Рассчитывают коэффициенты несимметрии тока, напряжений, мощности и коэффициенты гармонических колебаний, используя фильтр низких частот. Отфильтровывают спектр

исследуемых частот от общего сигнала. Затем определяют уровень влияния качества питающего напряжения в части наличия несимметрии, импульсов перенапряжения и высших гармонических составляющих и на основе получаемых данных с учетом текущего задания выходной координаты определяют техническое состояние электропривода и оценивают остаточный ресурс. Технический результат заключается в повышении эффективности обнаружении неисправности на ранней стадии возникновения. 1 ил.

RU 2 532 762 C 1

RU 2 532 762 C 1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2626231

**СПОСОБ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО
СОСТОЯНИЯ И ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО АГРЕГАТА С
АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Жуковский Юрий Леонидович (RU), Бабанова Ирина Сергеевна (RU), Королёв Николай Александрович (RU)*

Заявка № 2016144271

Приоритет изобретения 10 ноября 2016 г.

Дата государственной регистрации в
Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 24 июля 2017 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 10 ноября 2036 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 626 231** (13) **C1**(51) МПК
G01R 31/34 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2016144271, 10.11.2016

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
10.11.2016Дата регистрации:
24.07.2017

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 10.11.2016

(45) Опубликовано: 24.07.2017 Бюл. № 21

Адрес для переписки:

199106, Санкт-Петербург, В.О., 21 линия, 2,
ФГБОУ ВО СПбГУ, отдел интеллектуальной
собственности и трансфера технологий (отдел
ИС и ТТ)

(72) Автор(ы):

Жуковский Юрий Леонидович (RU),
Бабанова Ирина Сергеевна (RU),
Королёв Николай Александрович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Санкт-Петербургский горный
университет" (RU)(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 146950 U1, 20.10.2014."ДИАГНОСТИКА И ОЦЕНКА
ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО
ОБОРУДОВАНИЯ, РАБОТАЮЩЕГО В
ТЯЖЕЛЫХ УСЛОВИЯХ, ПО
ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ",
2011. US 6128583 A1, 03.10.2000; US 6297742
B1, 02.10.2001.(54) СПОСОБ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО
РЕСУРСА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО АГРЕГАТА С АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

(57) Реферат:

Изобретение относится к области диагностики технического состояния электромеханического оборудования, позволяющей производить диагностику и оценку остаточного ресурса асинхронного двигателя (АД), работающего в различных условиях эксплуатации, путем записи электрических и вибрационных параметров, с помощью датчиков вибрации, тока и напряжения, и использование искусственной нейронной сети (ИНС) для комплексного анализа электрических, вибрационных и косвенных параметров с дальнейшей оценкой технического состояния и прогнозирования вероятности безотказной работы электродвигателя (ЭД). Способ позволяет производить диагностику и оценку остаточного ресурса электропривода на базе асинхронного двигателя, работающего в различных условиях

эксплуатации, путем записи электрических и вибрационных параметров, с помощью датчиков вибрации, тока и напряжения и их комплексного анализа с использованием искусственной нейронной сети, позволяющей осуществлять прогнозирование и оценку остаточного ресурса. Технический результат заключается в повышении точности и качества оценки состояния и остаточного ресурса электромеханического оборудования с учетом качества питающей сети и условий эксплуатации, по полученным значениям остаточного ресурса с учетом выявленных состояний на основе работы ИНС, включающей анализ электрических, вибрационных и косвенных параметров и обнаруженных дефектов. 5 ил.

RU 2 6 2 6 2 3 1 C 1

RU 2 6 2 6 2 3 1 C 1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2648413

**СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ НА ОСНОВЕ
НЕЙРОСЕТЕВОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ
НЕИСПРАВНОСТЕЙ И ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
ЭЛЕКТРОПРИВОДНОГО ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО
АГРЕГАТА**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Жуковский Юрий Леонидович (RU), Бабанова Ирина Сергеевна (RU), Королёв Николай Александрович (RU)*

Заявка № 2017101942

Приоритет изобретения 20 января 2017 г.

Дата государственной регистрации в
Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 27 марта 2018 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 20 января 2037 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 648 413**⁽¹³⁾ **C1**(51) МПК
G05B 13/02 (2006.01)
G06N 3/02 (2006.01)
G05B 19/00 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G05B 13/02 (2006.01); G06N 3/02 (2006.01); G05B 19/00 (2006.01)

(21)(22) Заявка: 2017101942, 20.01.2017

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
20.01.2017Дата регистрации:
27.03.2018Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 20.01.2017

(45) Опубликовано: 27.03.2018 Бюл. № 9

Адрес для переписки:
199106, Санкт-Петербург, В.О., 21 линия, 2,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Санкт-Петербургский горный
университет", отдел интеллектуальной
собственности и трансфера технологий (отдел
ИС и ТТ)(72) Автор(ы):
Жуковский Юрий Леонидович (RU),
Бабанова Ирина Сергеевна (RU),
Королёв Николай Александрович (RU)(73) Патентообладатель(и):
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Санкт-Петербургский горный
университет" (RU)(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2445598 C1, 20.03.2012. RU
2242540 C1, 20.12.2004. RU 2313815 C2,
27.12.2007. US 6353815 B1, 05.03.2002.(54) СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО
ДИАГНОСТИРОВАНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ И ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
ЭЛЕКТРОПРИВОДНОГО ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА(57) Реферат:
Изобретение относится к диагностике
состояния электроприводных устройств. Способ
управления режимами на основе нейросетевого
диагностирования неисправностей и технического
состояния электроприводного
газоперекачивающего агрегата включает
измерение параметров, сбор информации и
проверку ее достоверности, фильтрацию
измерений, проверку измерений, корректировку
показаний измерений, сверку с ограничениями,
вычисление признаков оперативного
диагностирования, распознавание неисправностей
и расчет отклонений. Вычисление признаковоперативного диагностирования и распознавание
неисправностей осуществляют с учетом
алгоритмов, основанных на работе двух
нейронных сетей типа Кохонена, на основе
которых рассчитывают и оценивают
коэффициенты неисправностей по подсистемам:
смазки, нагнетателя, обмотки статора и
механических дефектов электродвигателя. Затем
оценивают техническое состояние на основании
полученных значений коэффициентов и выбирают
режим диагностирования и управления.
Повышается точность диагностики. 2 ил., 7 ил.

RU 2 648 413 C1

RU 2 648 413 C1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020615940

ПРОГРАММА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ
ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ

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

Авторы: *Жуковский Юрий Леонидович (RU), Васильев Богдан
Юрьевич (RU), Королёв Николай Александрович (RU)*

Заявка № 2020614463


Дата поступления 18 мая 2020 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 04 июня 2020 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Иблиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



RU2020615940

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства): 2020615940 Дата регистрации: 04.06.2020 Номер и дата поступления заявки: 2020614463 18.05.2020 Дата публикации и номер бюллетеня: 04.06.2020 Бюл. № 6 Контактные реквизиты: нет	Автор(ы): Жуковский Юрий Леонидович (RU), Васильев Богдан Юрьевич (RU), Королёв Николай Александрович (RU) Правообладатель(и): федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (RU)
--	---

Название программы для ЭВМ:
**ПРОГРАММА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ
 УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С
 ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ**

Реферат:

Программа может быть использована в проектировании автоматизированного электропривода с асинхронным двигателем и преобразователем частоты, а также в учебном процессе для студентов специальности 21.05.04 «Горное дело» специализации «Электрификация и автоматизация горного производства» и направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника». Программа обеспечивает выполнение следующих функций: расчет параметров схемы замещения асинхронного двигателя; выбор скалярного или векторного принципа управления; выбор структуры силового преобразователя частоты; выбор типа силовых управляемых ключей; определение оптимальных настроечных коэффициентов регуляторов при выбранных конфигурациях преобразователя частоты и асинхронного двигателя.

Язык программирования: C, Java

Объем программы для ЭВМ: 8 Мб

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021669187

**Программа управления преобразователями частоты для
лабораторного стенда «Конвейерный транспорт» для
ПЛК Schneider Electric M580**

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

Авторы: *Жуковский Юрий Леонидович (RU), Белоглазов
Илья Ильич (RU), Николаев Михаил Юрьевич (RU)*

Заявка № 2021668566

Дата поступления 22 ноября 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 24 ноября 2021 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**RU2021669187**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства): 2021669187 Дата регистрации: 24.11.2021 Номер и дата поступления заявки: 2021668566 22.11.2021 Дата публикации и номер бюллетеня: 24.11.2021 Бюл. № 12	Автор(ы): Жуковский Юрий Леонидович (RU), Белоглазов Илья Ильич (RU), Николаев Михаил Юрьевич (RU) Правообладатель(и): федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (RU)
---	---

Название программы для ЭВМ:
Программа управления преобразователями частоты для лабораторного стенда «Конвейерный транспорт» для ПЛК Schneider Electric M580

Реферат:

Программа предназначена для управления преобразователями частоты серии Altivar Schneider Electric, с помощью которых осуществляется управление электродвигателями лабораторного стенда «Конвейерный транспорт». Программа управления обеспечивает выполнение следующих функций: включение, выключение преобразователей частоты, сброс системных ошибок, включение режима «реверс», настройка частоты оборотов электродвигателей, контроль схода конвейерной ленты и автоматическая аварийная остановка конвейера, сбор электротехнических параметров с преобразователей частоты. Подключение к преобразователям частоты осуществляется по протоколу EtherNet/IP. Программа разработана в среде Unity Pro XL V13 и может быть использована в учебном процессе для студентов специальности 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств» в рамках дисциплины «Основы электропривода».

Язык программирования: ST МЭК 61131-3
 Объем программы для ЭВМ: 2 МБ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2505917

СИСТЕМА АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный минерально-сырьевой университет "Горный" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2012146725

Приоритет изобретения **01 ноября 2012 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **27 января 2014 г.**

Срок действия патента истекает **01 ноября 2032 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 505 917** ⁽¹³⁾ **C1**(51) МПК
H02P 9/02 (2006.01)**(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**

(21)(22) Заявка: 2012146725/07, 01.11.2012

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
01.11.2012

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 01.11.2012

(45) Опубликовано: 27.01.2014 Бюл. № 3

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 2419956 C1, 27.05.2011. RU 2396694
C1, 10.08.2010. RU 2071626 C1, 10.01.1997. SU
1039009 A1, 30.08.1983. US 6160722 A,
12.12.2000.

Адрес для переписки:

199106, Санкт-Петербург, В.О., 21 линия, 2,
ФГБОУ ВПО "Национальный минерально-
сырьевой университет "Горный", отдел
интеллектуальной собственности и
трансфера технологий (отдел ИС и ТТ)

(72) Автор(ы):

Абрамович Борис Николаевич (RU),
Жуковский Юрий Леонидович (RU),
Сычев Юрий Анатольевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Национальный минерально-сырьевой
университет "Горный" (RU)

RU 2 5 0 5 9 1 7 C 1

RU 2 5 0 5 9 1 7 C 1

(54) СИСТЕМА АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

(57) Реферат:

Изобретение относится к области энергообеспечения и электроэнергетики и может быть использовано для электроснабжения потребителей, как при наличии, так и отсутствии централизованной системы энергообеспечения. Технический результат заключается в осуществлении управления режимами напряжения при надежном электроснабжении потребителей, имеющих различный режим

энергопотребления. Для этого заявленная система содержит источник переменного тока, блок из трех автоматических расцепителей, синхронный электродвигатель, синхронный генератор с возбудителем, два стабилизатора переменного напряжения и потребляемые узлы, снабжено устройство включенными первым и вторым анализаторами напряжения, блоком управления режимом напряжения, источником бесперебойного питания и выключателем. 1 ил.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 181087

**УСТРОЙСТВО ДИАГНОСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ
ЧАСТОТЫ**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Жуковский Юрий Леонидович (RU), Васильев Богдан Юрьевич (RU), Королёв Николай Александрович (RU)*

Заявка № 2017136959

Приоритет полезной модели 19 октября 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 04 июля 2018 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 19 октября 2027 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Извиев Г.П. Извиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) RU (11) 181 087 (13) U1

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(51) МПК
G01R 31/34 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

Статус: действует (последнее изменение статуса: 07.09.2018)
Пошлина: учтена за 2 год с 20.10.2018 по 19.10.2019

(21)(22) Заявка: 2017136959, 19.10.2017(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
19.10.2017Дата регистрации:
04.07.2018Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 19.10.2017

(45) Опубликовано: 04.07.2018 Бюл. № 19

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 2155328 C1, 27.08.2000. RU
125718 U1, 10.03.2013. RU 2348050 C1,
27.02.2009. CN 201575925 U, 08.09.2010.Адрес для переписки:
199106, Санкт-Петербург, В.О., 21 линия, 2,
ФГБОУ высшего образования "Санкт-
Петербургский горный университет", отдел
интеллектуальной собственности и
трансфера технологий (отдел ИС и ТТ)(72) Автор(ы):
Жуковский Юрий Леонидович (RU),
Васильев Богдан Юрьевич (RU),
Королёв Николай Александрович (RU)(73) Патентообладатель(и):
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Санкт-Петербургский
горный университет" (RU)(54) УСТРОЙСТВО ДИАГНОСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ

(57) Реферат:

Полезная модель относится к области диагностики электрооборудования. Устройство содержит шину сигналов, микроконтроллерный блок, блок питания, шину питания, блоки измерений, подключенные к электрической линии с коммутационными аппаратами, питающей двигателя переменного тока, при этом блок измерений состоит из датчиков тока и напряжения. Технический результат заключается в повышении точности и достоверности оценки технического состояния

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017614351

**ГЕНЕРАТОР ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ВИБРАЦИОННЫХ
СИГНАЛОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО
ТОКА ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ И ОЦЕНКИ
ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА**

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

Авторы: *Жуковский Юрий Леонидович (RU), Котелева Наталья
Ивановна (RU), Королёв Николай Александрович (RU)*

Заявка № **2017611561**

Дата поступления **27 февраля 2017 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **12 апреля 2017 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев





ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства): 2017614351	Авторы: Жуковский Юрий Леонидович (RU), Котелева Наталья Ивановна (RU), Королёв Николай Александрович (RU)
Дата регистрации: 12.04.2017	Правообладатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (RU)
Номер и дата поступления заявки: 2017611561 27.02.2017	
Дата публикации: 12.04.2017	
Контактные реквизиты: нет	

Название программы для ЭВМ:
**ГЕНЕРАТОР ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ВИБРАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ И ОЦЕНКИ
ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА**

Реферат:

Программа относится к области диагностики технического состояния электрических машин переменного тока минерально-сырьевого комплекса и предназначена для формирования сигналов тока и напряжения статора, вибраций корпуса электрической машины переменного тока для последующей обработки. Разработанная программа основана на генерировании сигналов тока и напряжения в фазах электрической машины переменного тока, а также сигналов вибрации корпуса по трем направлениям (горизонтальное, вертикальное, осевое) в реальном времени или по заданному алгоритму для последующего определения технического состояния и остаточного ресурса электрической машины переменного тока и связанного с ней приводного оборудования. Программа обеспечивает выполнение следующих функций: генерирование сигналов фазных напряжений и токов статора, содержащих гармонические и интергармонические колебания, характерные для определенного вида и уровня дефекта составных частей машины переменного тока, и связанного с ней приводного оборудования, а также соответствующие определенному виду и уровню показателей качества электрической энергии; генерирование сигналов вибраций корпуса машины переменного тока по трем направлениям (горизонтальное, вертикальное, осевое), содержащих гармонические и интергармонические колебания, характерные для определенного вида и уровня дефекта составных частей машины переменного тока, и связанного с ней приводного оборудования; создание эталонных начальных и предельных образцов сигналов тока статора машины переменного тока на основе расчетных и паспортных данных в зависимости от нагрузки, а также на основе предельно допустимых параметров, приведенных в нормативно-технической документации; расчет характерных частот, соответствующих определенным неисправностям машины переменного тока, и связанного с ней приводного оборудования.

Тип реализующей ЭВМ: IBM PC - совмест. ПК

Язык программирования: G, Lab VIEW

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2727386

**УСТРОЙСТВО ДИАГНОСТИКИ И ОЦЕНКИ
ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Королёв Николай Александрович (RU), Васильев Богдан Юрьевич (RU), Жуковский Юрий Леонидович (RU), Желтиков Николай Олегович (RU)*

Заявка № 2019134080

Приоритет изобретения 23 октября 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 21 июля 2020 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 23 октября 2039 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 727 386**⁽¹³⁾ **C1**(51) МПК
G01R 31/34 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G01R 31/34 (2020.02)

(21)(22) Заявка: 2019134080, 23.10.2019

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
23.10.2019Дата регистрации:
21.07.2020

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 23.10.2019

(45) Опубликовано: 21.07.2020 Бюл. № 21

Адрес для переписки:

199106, Санкт-Петербург, В.О., 21 линия, 2,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Санкт-Петербургский горный
университет", Патентно-лицензионный отдел

(72) Автор(ы):

Королёв Николай Александрович (RU),
Васильев Богдан Юрьевич (RU),
Жуковский Юрий Леонидович (RU),
Желтиков Николай Олегович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Санкт-Петербургский горный
университет" (RU)(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2578044 C1, 20.03.2016. RU 193341
U1, 24.10.2019. RU 111684 U1, 20.12.2011. RU
2626231 C1, 24.07.2017. US 6297742 B1,
02.10.2001.(54) УСТРОЙСТВО ДИАГНОСТИКИ И ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

(57) Реферат:

Изобретение относится к области диагностики электрооборудования и позволяет производить оценку технического состояния и остаточного ресурса электродвигателя и сопряженного с ним механического оборудования путем регистрации мгновенных значений вибраций, шума, температуры посредством датчиков с последующей диагностикой и прогнозированием технического состояния и оценкой остаточного ресурса электродвигателя, реализованной программно с беспроводной передачей диагностических данных на сервер, при этом с установкой устройства на корпус электродвигателя и обеспечением автономности его питания. Устройство диагностирования и оценки остаточного ресурса электродвигателей включает блок функциональной диагностики, блок расчета остаточного ресурса, датчики температуры и датчики вибрации, выходы которых подключены к блоку функциональной

диагностики. Устройство дополнительно содержит не менее двух датчиков шума, выходы которых соединены со входами блока функциональной диагностики и блока прогнозирования, выходы которых подключены к входу блоку расчета остаточного ресурса, выход которого соединен со входом передатчика, который соединен по беспроводному каналу связи с сервером и через него с мобильным устройством. Техническим результатом является повышение технологической совместимости системы диагностики за счет возможности производить диагностику электромеханических систем и обеспечение сбора информации о фактическом состоянии электродвигателя и сопряженного с ним механического оборудования, хранения и обработки статистической информации на сервере при минимальной элементной базе и отсутствии силовых и коммуникационных проводов. 1 ил.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023660650

ПРОГРАММА РАСПОЗНАВАНИЯ НАЛИЧИЯ
ДЕФЕКТА ПОДШИПНИКА АСИНХРОННОГО
ДВИГАТЕЛЯ

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

Авторы: *Жуковский Юрий Леонидович (RU), Булдыско Александра Дмитриевна (RU)*

Заявка № 2023617330

Дата поступления 19 апреля 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 23 мая 2023 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

RU

2023660650

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(12) ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства):

2023660650

Дата регистрации: 23.05.2023

Номер и дата поступления заявки:

2023617330 19.04.2023

Дата публикации: 23.05.2023

Контактные реквизиты:

нет

Авторы:

Жуковский Юрий Леонидович (RU),
Булдыско Александра Дмитриевна (RU)

Правообладатель:

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет» (RU)

Название программы для ЭВМ:

**ПРОГРАММА РАСПОЗНАВАНИЯ НАЛИЧИЯ ДЕФЕКТА ПОДШИПНИКА
АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ****Реферат:**

Программа может быть использована в эксплуатации и при анализе технического состояния автоматизированного электропривода с асинхронным двигателем и преобразователем частоты, а также в учебном процессе для студентов специальности 21.05.04 «Горное дело» специализации «Электрификация и автоматизация горного производства» и направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» по профилю «Электропривод и автоматика». Программа реализует алгоритм определения состояния подшипников асинхронного двигателя. Математический аппарат на основе сингулярного разложения позволяет определить характерные изменения компонент, связанных с развитием дефекта. На основе визуальной оценки и расчета относительного вклада определяется уровень развития повреждения. Данный расчет выполняется поочередно для каждой из фаз рассматриваемой сигнатуры тока. Тип ЭВМ: IBM PC – совмест. ПК; ОС: Windows XP/Vista/7/8/10, Linux, macOS.

Язык программирования: Python 3

Объем программы для ЭВМ: 15 МБ

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Акты внедрения результатов диссертационного исследования



СЕВЗАПТЕХНИКА.РФ



Утверждаю

Генеральный директор

ООО «СЕВЗАПТЕХНИКА»

Лях Александр Доминикович

Дата «08» 11/2023 2023г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования

Жуковского Юрия Леонидовича

«Теория, методы и средства обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации электромеханического оборудования в электротехнических комплексах горных и нефтегазовых предприятий на основе цифровых технологий» по научной специальности 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы»

Настоящим актом подтверждается положительное решение рабочей комиссии о принятии к использованию результатов диссертационного исследования на тему «Теория, методы и средства обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации электромеханического оборудования в электротехнических комплексах горных и нефтегазовых предприятий на основе цифровых технологий» в производственной деятельности ООО «СЕВЗАПТЕХНИКА».

Разработанный в диссертации алгоритм нейросетевого диагностирования неисправностей и оценки технического состояния принят к использованию для повышения безопасности эксплуатации автономных дизель-генераторных электростанций, обеспечивающих энергоснабжение электротехнических комплексов нефтегазовых предприятий. Применение данного алгоритма позволит сократить

внеплановые простои электростанций и сократить недоотпуск электроэнергии потребителям.

Председатель комиссии:

Генеральный директор
ООО «СЕВЗАПТЕХНИКА»

А.Д. Лях

Члены комиссии:

Заместитель генерального директора
ООО «СЕВЗАПТЕХНИКА»

А.Г. Гусев

Технический директор
ООО «СЕВЗАПТЕХНИКА»

А.А. Шульженко



Утверждаю

Руководитель филиала в
СЗФО АО «МЦД»

Феоктистов А.Ю.

Печать организации
Дата «20» июня 2023 г.



АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования

Жуковского Юрия Леонидовича

«Теория, методы и средства обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации электромеханического оборудования в электротехнических комплексах горных и нефтегазовых предприятий на основе цифровых технологий» по научной специальности 2.4.2

«Электротехнические комплексы и системы»

Настоящим актом подтверждается использование следующих результатов диссертационного исследования на тему «Теория, методы и средства обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации электромеханического оборудования в электротехнических комплексах горных и нефтегазовых предприятий на основе цифровых технологий»: метод мониторинга процесса измельчения в барабанных мельницах на основе сравнения спектра потребляемого тока и эталонных сигналов, сформированных на цифровых моделях оборудования.

Результаты использовались при построении цифровых моделей, а именно создании алгоритмов и обучении для определения дефектов мельниц. Использование указанных алгоритмов необходимо для перехода на систему технического обслуживания и ремонта по фактическому состоянию, а в последствии к предиктивной системе, что позволяет снизить число аварийных остановок оборудования и увеличить производительность.

Директор филиала в СЗФО –

Директор по развитию бизнеса, к.т.н.

Феоктистов А. Ю.



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«КОМПЛЕКСНЫЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

198206, г. Санкт-Петербург, Петергофское шоссе, д. 73У ИНН: 5321205680
ТЕЛЕФОН: +7 (812) 209-90-91 E-MAIL: info@kit-electro.ru www.kit-electro.ru
КПП: 532101001 ОГРН: 1215300000893 ОКПО: 47205784



АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования
Жуковского Юрия Леонидовича
«Теория, методы и средства обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации
электромеханического оборудования в электротехнических комплексах горных и
нефтегазовых предприятий на основе цифровых технологий»
по научной специальности 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы»

Комиссия (рабочая) в составе:

Председатель – Технический директор Овчинников Александр Витальевич

Члены комиссии – Директор по развитию Иванов Илья Валерьевич

Директор по маркетингу Зимовец Алексей Иванович

Руководитель направления сервиса Кулик Андрей Александрович

составили настоящий акт о том, что подтверждается использование следующих результатов диссертационного исследования на тему «Теория, методы и средства обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации электромеханического оборудования в электротехнических комплексах горных и нефтегазовых предприятий на основе цифровых технологий»: методика оценки остаточного ресурса по электрическим параметрам на основе анализа коэффициента изменения потерь.

Результаты использовались при создании алгоритмов работы микропроцессорных устройств релейной защиты в электротехнических комплексах, имеющих в своем составе электропривод, построенный на основе двигателей переменного тока. Использование оценки технического состояния по электрическим параметрам позволяет обеспечить эффективное планирование технического обслуживания, а также снижение затрат связанные с внеплановыми простоями.

Председатель комиссии

Технический директор Овчинников Александр Витальевич

Члены комиссии:

Директор по развитию Иванов Илья Валерьевич

Директор по маркетингу Зимовец Алексей Иванович

Руководитель направления сервиса Кулик Андрей Александрович



АО «Гипроцветмет»
 Звездный бульвар, д. 23, стр. 10, эт. 2, пом. 1
 Москва, а/я 25, 129075
 Тел.: +7 (495) 600-32-00, e-mail: office@giprocm.ru
 ОКПО 00198404, ОГРН 1137746314640
 ИНН/КПП 7717750345/771701001

Утверждаю
 Генеральный директор
 Н.А. Липницкий

М.П.

Дата «_____» _____ 2023 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационного исследования
 Жуковского Юрия Леонидовича.

«Теория, методы и средства обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации электромеханического оборудования в электротехнических комплексах горных и нефтегазовых предприятий на основе цифровых технологий» по научной специальности 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы»

Рабочая комиссия в составе:

Председатель комиссии:

- директор по науке и инновационной деятельности, канд. техн. наук, Куранов Антон Дмитриевич;

Члены комиссии:

- начальник горного отдела, Гордымов Александр Николаевич,
 - главный инженер проекта, Черепанов Андрей Владимирович.

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационного исследования на тему «Теория, методы и средства обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации электромеханического оборудования в электротехнических комплексах горных и нефтегазовых предприятий на основе цифровых технологий», представленной на соискание ученой степени доктора наук, использованы при ведении проектной и экспертной работы в деятельности АО «Гипроцветмет» при разработке технико-коммерческих предложений в части сопровождения проектирования электротехнических комплексов в части оценки возможного уровня воздействия на потребление энергии и количества вредных выбросов.

Результаты диссертационного исследования приняты к внедрению при проработке технических решений в части ТОиР отображены в документации:

-«Технико-коммерческое предложение на выполнение работ по объекту:
 «Технический проект разработки Талдинского каменноугольного месторождения в

границах лицензии на право пользования недрами КЕМ 11672 ТЭ филиала АО "УК "Кузбассразрезуголь" "Талдинский угольный разрез»» от 14.06.2023.

По результатам совместных разработок получено 0 патентов.

Использование указанных результатов позволяет повысить качество проектирования: переход к предсказательному управлению ТОиР позволит сократить потребление электроэнергии и количество вредных выбросов.

Председатель комиссии

Директор по науке и инновационной
деятельности, канд. техн. наук



Куранов А.Д.

Члены комиссии:

Начальник горного отдела
Главный инженер проекта



Гордымов А.Н.

Черепанов А.В.



ООО «АВТОТЕХИНМАШ»

214032, РФ, г. Смоленск, ул. Лавочкина, д. 104, пом.11
тел: +7-911-600-13-98, e-mail: info@atim-belaz.com

www.atim-belaz.com

Утверждаю

Член совета директоров

ООО «АВТОТЕХИНМАШ»

Хомич Юрий Иванович

Дата «12» июля 2023г



АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования

Жуковского Юрия Леонидовича

«Теория, методы и средства обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации электромеханического оборудования в электротехнических комплексах горных и нефтегазовых предприятий на основе цифровых технологий» по научной специальности 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы»

Настоящим актом подтверждается использование следующих результатов диссертационного исследования на тему «Теория, методы и средства обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации электромеханического оборудования в электротехнических комплексах горных и нефтегазовых предприятий на основе цифровых технологий»:

- при сервисном обслуживании и ремонте карьерной, шахтной и специальной техники для определения потерь и эквивалента вредных выбросов, обусловленных техническим состоянием электромеханического оборудования, использовалась модель оценки жизненного цикла эксплуатации. Результаты моделирования показали целесообразность применения оценки жизненного цикла эксплуатации для управления техническим обслуживанием и ремонтом. В частности, изменение межремонтных периодов на основе данных о потерях электроэнергии позволит снизить суммарные затраты на потери электроэнергии до 10% усредненно на всем сроке эксплуатации техники;

- принято положительное решение о пилотном внедрении информационных сервисов на основе алгоритмов дополненной реальности, что, по оценке компании, позволит улучшить качество проводимых ремонтов, снизит время обслуживания и ремонта, повысит безопасность персонала при проведении работ;

- ряд информационных сервисов и алгоритмов (*мониторинга диагностических параметров, прогнозирование технического состояния и остаточного ресурса и др.*) предложенных в исследовании одобрены при реализации проекта создания исследовательской лаборатории «Автономных электромеханических систем электродвижения горной техники» на базе Санкт-Петербургского горного университета, на основании протокола технического совещания по проекту испытательного стенда имитирующего работу КТЭО самосвала БЕЛАЗ и его комплектующих между ООО «АВТОТЕХИНМАШ», ОАО «БЕЛАЗ», ООО «Русэлпром. Электрические машины» и СПбГУ от 15.07.2022 года №б/н.

Член совета директоров
ООО «АВТОТЕХИНМАШ»
Хомич Юрий Иванович





АО «Готэк Северо-Запад»
188682, Ленинградская обл., Всеволожский р-н.,
д. Новосаратовка, д. 6, ЛИТЕРА А, офис 1
т.: (812) 702-54-32
e-mail: gotek-severozapad@gotek.ru

Утверждаю:

Директор АО «Готэк Северо-Запад»

Бородин С.А.



2023г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования

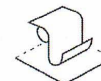
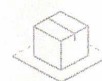
Жуковского Юрия Леонидовича

«Теория, методы и средства обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации электромеханического оборудования в электротехнических комплексах горных и нефтегазовых предприятий на основе цифровых технологий» по научной специальности 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы»

Настоящим актом подтверждается использование следующих результатов диссертационного исследования на тему «Теория, методы и средства обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации электромеханического оборудования в электротехнических комплексах горных и нефтегазовых предприятий на основе цифровых технологий»: метод оценки взаимного влияния фактического состояния и энергетических потоков структурных элементов электротехнического комплекса, учитывающего сценарные условия их функционирования.

Результаты использовались при оценке рисков безопасной эксплуатации электромеханического оборудования с учетом сценарных условий в зависимости от вероятности возникновения дефектов и уровня потерь электроэнергии в процессе эксплуатации обусловленных его техническим состоянием.

При анализе электромеханического оборудования в системах ленточных транспортеров, производственных линиях, а также многодвигательном приводе машин установлены суммарные риски нарушения безопасной эксплуатации с учетом сценарных условий. Сформированы рекомендации по группам электромеханического оборудования с высокими и очень высокими рисками, а также диагностическому контролю видов повреждения в электрических машинах и силовых преобразователях с учетом влияния системы электроснабжения.



По оценкам службы ТОиР управление техническими воздействиями на основе предложенного сценарного подхода оценки рисков с учётом взаимного влияния и потерь электроэнергии позволит снизить аварийные простои на 15% и обеспечить безопасную эксплуатацию электромеханического оборудования при переходе к предсказательной системе управления техническим обслуживанием и ремонтом.

Члены комиссии:

Директор по производству



Е.М. Семенов

Главный энергетик



А.Н. Шиповалов

Начальник службы ТОиР



А.В. Ложкин

УТВЕРЖДАЮ



Проректор по образовательной деятельности
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный
университет»

к.т.н., доц. Д.Г. Петраков

04 2023г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс

Результаты диссертационной работы Жуковского Юрия Леонидовича «Теория, методы и средства обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации электромеханического оборудования в электротехнических комплексах горных и нефтегазовых предприятий на основе цифровых технологий» внедрены в учебный процесс Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

В частности, разработанные автором способы диагностики электромеханического оборудования по электрическим параметрам изучаются на практических и лабораторных занятиях в курсе «Эксплуатация электропривода» для специальности 21.05.04 Горное дело специализация «Электрификация и автоматизация горного производства» и направления подготовки бакалавров 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника профиль «Электропривод и автоматика».

В ходе практических занятий обучающиеся изучают приборы необходимые для диагностики и оценки остаточного ресурса электроприводов переменного тока, виды неисправностей и характерные расчетные частоты при спектральном разложении тока статора.

Методические указания по выполнению лабораторных работ «Эксплуатация систем электропривода предприятий горной и нефтегазовой промышленности. Диагностика электропривода переменного тока» изданные в Горном университете используются при проведении лабораторных работ с 2010 года. В процессе проведения лабораторных работ студенты приобретают навыки проведения экспериментальных исследований электроприводов переменного тока, анализа результатов, полученных в процессе работы.

Декан энергетического факультета, д.т.н., проф.

И.О. заведующего кафедрой
электроэнергетики и электромеханики к.т.н., доц.

Шпенст В.А.

Бабурин С.В.

**МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

(Минэнерго России)

ПРОТОКОЛ**заседания Научно-технического совета угольной промышленности
(далее – Совет)**19.12.2023№ 12-130-пр

Москва

Председатель Совета – С.В. Мочальников
Секретарь заседания Совета – Л.Н. Батугина.

Присутствовали: 25 человек (список прилагается).

ПОВЕСТКА ДНЯ:

1. О разработке общеотраслевого альбома технологических схем подготовки и отработки выемочных участков угольных шахт.

1.1. СЛУШАЛИ:

Сообщение О.И. Казанина о разработке общеотраслевого альбома технологических схем подготовки и отработки выемочных участков угольных шахт (далее – Альбом). Презентационный материал прилагается.

1.2. ВЫСТУПИЛИ:

А.В. Бондарев, М.М. Верзилов, В.М. Вернигор, С.В. Мясников, В.В. Соболев.

1.3. ОТМЕТИЛИ:

1.3.1. Необходимо определить задачи для формирования проекта технического задания на разработку Альбома (горно-геологические и горнотехнические условия; системы разработки; применяемая техника; технико-экономические показатели), определиться со структурой Альбома. От этого будет зависеть стоимость и сроки разработки Альбома.

1.3.2. От членов Совета поступили предложения в проект технического задания на разработку Альбома. Часть поступивших предложений принимаются. Некоторые требуют обсуждения (приведены в обобщенном виде на слайде 5).

1.3.3. Предложено дополнить проект общепромышленного Альбома технологическими схемами, используемыми при сплошной системе отработки на шахтах Донбасса с пологим залеганием угольных пластов, с проработкой концевых операций на сопряжениях лавы с подготовительными штреками, предусмотрев современные технологии выкладки в выработанном пространстве бытовых полос и для шахт Донбасса с крутым падением пластов, где для добычи угля применяются комбайны, щитовые агрегаты или отбойные молотки с индивидуальным креплением.

1.3.4. Альбом может быть утвержден как руководство по безопасности, и он будет иметь рекомендательный характер. При этом у Ростехнадзора нет полномочий утверждать документы, регламентирующие проектирование технологических процессов.

1.3.5. В части глубины ведения горных работ необходимо понимание динамики ее изменения и влияния на принимаемые технологические решения. Предложено предусмотреть периодичность актуализации Альбома, например, каждые 10 лет.

1.4. РЕШИЛИ:

1.4.1. Информацию докладчика принять к сведению.

1.4.2. Членам Совета представить предложения по задачам для формирования проекта технического задания на разработку Альбома (горно-геологические и горнотехнические условия; системы разработки; применяемая техника; технико-экономические показатели) и по структуре Альбома, в том числе с учетом пунктов 1.3.3, 1.3.4 и 1.3.4 настоящего протокола, в Департамент угольной промышленности Минэнерго России, в том числе на электронную почту BatuginaLN@minenergo.gov.ru.

Срок: до 22 января 2024 г.

1.4.3. Рекомендовать ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» с участием угольных компаний подготовить проект

технического задания на разработку Альбома и направить в Департамент угольной промышленности Минэнерго России, в том числе на электронную почту BatuginaLN@minenergo.gov.ru.

Срок: до 20 февраля 2024 г.

2. О практической реализации статьи 25 Федерального закона от 20 июня 1996 г. № 81-ФЗ «О государственном регулировании в области добычи и использования угля, об особенностях социальной защиты работников организаций угольной промышленности». Презентация обновленной программы повышения квалификации «Безопасное управление горными и взрывными работами на шахтах».

2.1. СЛУШАЛИ:

Сообщение С.В. Юнгблюдта о дополнительной профессиональной образовательной программе «Безопасное управление горными и взрывными работами на шахтах» (далее – Программа ПК, прилагается).

2.2. ВЫСТУПИЛИ:

М.М. Верзилов.

2.3. ОТМЕТИЛИ:

2.3.1. Программа ПК разработана с учетом квалификационных требований, указанных в едином квалификационном справочнике должностей руководителей, специалистов и других служащих.

2.3.2. Программа ПК согласована федеральным учебно-методическим объединением в системе высшего образования по укрупнённой группе специальностей/направлений (УГСН) «Прикладная геология, горное дело, нефтегазовое дело и геодезия» (протокол от 18.10.2023 № 2).

2.3.3. Учебный план Программы ПК определяет перечень, последовательность, общую трудоемкость дисциплин и формы контроля знаний. Образовательная деятельность слушателей предусматривает: лекции; практические и самостоятельные работы; итоговую аттестацию (в форме, определяемой образовательной организацией или организацией, осуществляющей образовательную деятельность самостоятельно). Продолжительность программы 168 академических часов. Минимальный срок

обучения: 72 часа, 2 (недели). Форма обучения: очно-заочная, включая контактную работу с преподавателем

2.4. РЕШИЛИ:

2.4.1. Информацию докладчика принять к сведению.

2.4.2. Департаменту угольной промышленности Минэнерго России направить копию Программы ПК членам Совета и в угольные компании с настоящим протоколом.

Срок: 22 декабря 2023 г.

2.4.3. Рекомендовать угольным компаниям организовать сотрудничество с ФГАОУ ДПО «Петербургский энергетический институт повышения квалификации» по вопросам повышения квалификации специалистов по направлению «горное дело».

Срок: на постоянной основе.

3. О цифровых технологиях в сфере промышленной безопасности и охраны труда на предприятиях угольной промышленности.

3.1. СЛУШАЛИ:

Сообщения В.В. Аксёнова о цифровых технологиях в сфере промышленной безопасности и охраны труда на предприятиях угольной промышленности (презентационный материал прилагается).

3.2. ВЫСТУПИЛИ:

М.М. Верзилов, С.В. Мясников.

3.3. ОТМЕТИЛИ:

3.3.1. Информационная система «INSIGHT» состоит в настоящее время из 22 блоков, которые включают в себя 163 модуля.

3.3.2. Информационная система «INSIGHT» позволяет решать следующие задачи:

руководителю: повысить уровень безопасности производства, эффективности работы отдела промышленной безопасности и охраны труда; обеспечить эффективное функционирование системы управления промышленной безопасностью и охраной труда путем систематического и оперативного анализа ситуации,

прогнозирования развития и своевременного принятия необходимых управленческих решений; контролировать бюджет;

инженерам: сократить время на планирование; эффективно контролировать выполнение мероприятий промышленной безопасности и охраны труда подконтрольными подразделениями; значительно уменьшить трудоемкость и сократить время подготовки отчетов; повысить точность предоставляемой в отчетах информации; своевременно узнавать об изменениях нормативной базы; сократить время на обработку информации;

специалистам в подразделениях: быстро и эффективно выполнять необходимые (для промышленной безопасности, охраны труда и пр.) задачи и мероприятия; не пропустить сроки выполнения задач/мероприятий; получить информацию из встроенной базы знаний; сократить время на обработку информации.

3.3.3. В настоящее время ООО «АИМ Менеджмент» сотрудничает с четырьмя крупнейшими энергетическими компаниями, но в принципе система может быть использована и другими пользователями.

3.3.4. ООО «АИМ Менеджмент» с партнерами проведена серьезная большая работа.

3.3.5. В соответствии с пунктом 24 Правил безопасности в угольных шахтах, утвержденных приказом Ростехнадзора от 08.12.2020 № 507, «угледобывающая организация должна осуществлять дистанционный мониторинг (контроль) параметров безопасности, регистрируемых МФСБ шахт. В рамках мониторинга (контроля) параметров безопасности угледобывающая организация должна обеспечить учет, анализ и оценку идентифицированных опасностей, и передачу обработанной информации о выявленных критических изменениях контролируемых параметров безопасности шахты и срабатывании систем противоаварийной защиты по каналам связи в территориальный орган Ростехнадзора». Следовательно, подобные системы должны быть в каждой угледобывающей организации.

3.4. РЕШИЛИ:

3.4.1. Информацию докладчика принять к сведению.

3.4.2. Рекомендовать членам Совета и организациям угольной промышленности при эксплуатации информационных систем по промышленной безопасности и охране труда предусмотреть их совершенствование с учетом опыта АО «СУЭК» по эксплуатации информационной системы «INSIGHT».

4. О рассмотрении актов внедрения результатов исследования по теме «Теория, методы и средства обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации электромеханического оборудования в электротехнических комплексах горных и нефтегазовых предприятий на основе цифровых технологий».

4.1. СЛУШАЛИ:

Доклад Ю.Л. Жуковского «О результатах исследования на тему «Теория, методы и средства обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации электромеханического оборудования в электротехнических комплексах горных и нефтегазовых предприятий на основе цифровых технологий» (далее – научный доклад). Презентационный материал прилагается.

4.2. ВЫСТУПИЛИ:

М.М. Верзилов.

4.3. ОТМЕТИЛИ:

4.3.1. Научный доклад подготовлен для представления на соискание ученой степени доктора технических наук по научной специальности 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы;

4.3.2. Результаты исследования на тему «Теория, методы и средства обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации электромеханического оборудования в электротехнических комплексах горных и нефтегазовых предприятий на основе цифровых технологий» использованы:

4.3.2.1. по субъекту внедрения ООО «АВТОТЕХИНМАШ»:

– при сервисном обслуживании и ремонте карьерной, шахтной и специальной техники для определения потерь и эквивалента вредных выбросов, обусловленных техническим состоянием электромеханического оборудования, использовалась модель оценки жизненного цикла эксплуатации. Результаты моделирования показали целесообразность применения оценки жизненно цикла

эксплуатации для управления техническим обслуживанием и ремонтом. В частности, изменение межремонтных периодов на основе данных о потерях электроэнергии позволит снизить суммарные затраты на потери электроэнергии до 10% усредненно на протяжении всего срока эксплуатации техники;

– принято положительное решение о пилотном внедрении информационных сервисов на основе алгоритмов дополненной реальности, что, по оценке компании, позволит улучшить качество проводимых ремонтов, снизит время обслуживания и ремонта, повысит безопасность персонала при проведении работ;

– ряд информационных сервисов и алгоритмов (мониторинг диагностических параметров, прогнозирование технического состояния и остаточного ресурса и др.), предложенных в исследовании, одобрены при реализации проекта создания исследовательской лаборатории «Автономных электромеханических систем электродвижения горной техники» на базе ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», на основании протокола технического совещания по проекту испытательного стенда, имитирующего работу комплекта тягового электрооборудования самосвала БЕЛАЗ и его комплектующих между ООО «АВТОТЕХИНМАШ», ОАО «БЕЛАЗ», ООО «Русэлпром. Электрические машины» и СПбГУ от 15.07.2022 года №1;

4.3.2.2. по субъекту внедрения СЗФО АО «МЦД» (моделирование и цифровые двойники):

в виде метода мониторинга процесса измельчения в барабанах мельницах на основе сравнения спектра потребляемого тока и эталонных сигналов, сформированных на цифровых моделях оборудования;

при построении цифровых моделей, а именно создании алгоритмов и обучении для определения дефектов мельниц. Использование указанных алгоритмов необходимо для перехода на систему технического обслуживания и ремонта по фактическому состоянию, а в последствии к предиктивной системе, что позволяет снизить число аварийных остановок оборудования и увеличить производительность.

4.3.2.3. по субъекту внедрения ООО «Научно-производственное предприятие «Комплексные интеллектуальные технологии»:

в виде методики оценки остаточного ресурса по электрическим параметрам на основе анализа коэффициента изменения потерь;

при создании алгоритмов работы микропроцессорных устройств релейной защиты в электротехнических комплексах, имеющих в своем составе электропривод, построенный на основе двигателей переменного тока. Использование оценки технического состояния по электрическим параметрам позволяет обеспечить эффективное планирование технического обслуживания, а также снижение затрат связанные с внеплановыми простоями;

4.3.2.4. по субъекту внедрения ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет» императрицы Екатерины II:

внедрены в учебный процесс Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» императрицы Екатерины II (далее – Горный университет).

В частности, разработанные автором способы диагностики электромеханического оборудования по электрическим параметрам изучаются на практических и лабораторных занятиях в курсе «Эксплуатация электропривода» для специальности 21.05.04 Горное дело специализация «Электрификация и автоматизация горного производства» и направления подготовки бакалавров 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника профиль «Электропривод и автоматика».

В ходе практических занятий обучающиеся изучают приборы, необходимые для диагностики и оценки остаточного ресурса электроприводов переменного тока, виды неисправностей и характерные расчетные частоты при спектральном разложении тока статора.

Методические указания по выполнению лабораторных работ «Эксплуатация систем электропривода предприятий горной и нефтегазовой промышленности. Диагностика электропривода переменного тока», изданные в Горном университете используются при проведении лабораторных работ с 2010 года. В процессе проведения лабораторных работ студенты приобретают навыки проведения

экспериментальных исследований электроприводов переменного тока, анализа результатов, полученных в процессе работы.

4.4. РЕШИЛИ:

4.4.1. Информацию Ю.Л. Жуковского, изложенную в научном докладе, принять к сведению.

4.4.2. На основании рассмотрения актов внедрения результатов исследования Ю.Л. Жуковского, подготовившего диссертацию на тему «Теория, методы и средства обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации электромеханического оборудования в электротехнических комплексах горных и нефтегазовых предприятий на основе цифровых технологий» на соискание ученой степени доктора технических наук по научной специальности 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы, признать существенными для развития топливно-энергетического комплекса, решения актуальных задач повышения безопасности и эффективности, стоящих перед горной отраслью.

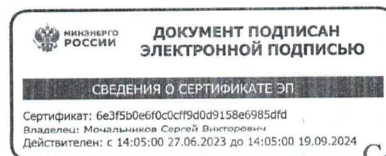
4.4.3. Рекомендовать Департаменту угольной промышленности Минэнерго России использовать результаты исследования Ю.Л. Жуковского в текущей деятельности в рамках компетенций.

Все презентационные материалы и Программу ПК направить членам Совета и в угольные компании с настоящим протоколом.

- Приложение:
1. Список участников заседания Совета на 2 л. в 1 экз.
 2. Презентационный материал на 59 л. в 1 экз.
 3. Копия Программы ПК на 21 л. в 1 экз.

Председатель Совета,
Заместитель Министра
энергетики Российской
Федерации

Департамент угольной промышленности
Батугина Любовь Николаевна
(495) 631-86-36



С.В. Мочальников

СПИСОК
участников Список участников заседания
Научно-технического совета угольной промышленности

19 декабря 2023 г.

№ п. п.	ФИО	Занимаемая должность, организация
От Минэнерго России		
1.	ВЕРЗИЛОВ МИХАИЛ МИХАЙЛОВИЧ	заместитель директора Департамента угольной промышленности
2.	КАБАНОВ НИКИТА СЕРГЕЕВИЧ	начальник отдела промышленной безопасности и экологии Департамента угольной промышленности
3.	ПАНИНА АЛЬБИНА СЕРГЕЕВНА	ведущий советник отдела промышленной безопасности и экологии Департамента угольной промышленности
4.	БАТУГИНА ЛЮБОВЬ НИКОЛАЕВНА	сотрудник отдела промышленной безопасности и экологии Департамента угольной промышленности
Члены Научно-технического совета угольной промышленности		
5.	БОНДАРЕВ АЛЕКСЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ	заведующий лабораторией горной геофизики ООО «МНЦ ГЕОМЕХ»
6.	ВЕРНИГОР ВЛАДИМИР МИХАЙЛОВИЧ	технический директор АО «Технологии контроля безопасности»
7.	ГРИГОРЬЕВ АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ	заместитель генерального директора, руководитель департамента исследований ТЭК АНО «ИПЕМ»
8.	ЕФИМОВ ВИКТОР ИВАНОВИЧ	заместитель директора по перспективному развитию филиала в г. Москва АО ХК «СДС-Уголь»
9.	ЗАХАРОВ ВАЛЕРИЙ НИКОЛАЕВИЧ	директор ИПКОН РАН
10.	КАЗАНИН ОЛЕГ ИВАНОВИЧ	декан горного факультета ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»
11.	КУБРИН СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ	заведующий лабораторией ИПКОН РАН

12.	МЕШКОВ АНАТОЛИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ	технический директор АО «СУЭК»
13.	МЯСНИКОВ СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ	заместитель начальника Управления по надзору в угольной промышленности Ростехнадзора
14.	НУРГАЛИЕВ ЗУФИР АНАСОВИЧ	исполнительный директор ОООРУП
15.	СЕРЕБРЯКОВ НИКОЛАЙ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ	начальник производственного Управления блока по добыче угля ООО «КОУЛСТАР»
16.	СОБОЛЕВ ВИКТОР ВАСИЛЬЕВИЧ	главный научный сотрудник АО «НЦ ВостНИИ»
Приглашенные		
17.	АКСЕНОВ ВЛАДЛЕН ВЛАДИМИРОВИЧ	исполняющий обязанности директора по производственной безопасности ООО «АИМ Менеджмент»
18.	БЕДАРЕВ ОЛЕГ АЛЕКСАНДРОВИЧ	заместитель директора по производственному контролю и охране труда АО «УК «Кузбассразрезуголь»
19.	ЕВТУШЕНКО ДМИТРИЙ ЮРЬЕВИЧ	заместитель технического директора по промышленной безопасности и охране труда АО «УК «Кузбассразрезуголь»
20.	ЖУКОВСКИЙ ЮРИЙ ЛЕОНИДОВИЧ	директор Учебно-научного центра цифровых технологий ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II
21.	КОЛОДЕЦА ПАВЕЛ	руководитель Дирекции по информационным технологиям ФГБУ РЭА Минэнерго России
22.	ЛЕОНОВ ВЯЧЕСЛАВ АЛЕКСАНДРОВИЧ	начальник департамента по охране труда и промышленной безопасности АО «УК «Кузбассразрезуголь»
23.	ЛИСОВСКИЙ ВЛАДИМИР ВЛАДИМИРОВИЧ	руководитель департамента ОТ и ПБ АО «СУЭК».
24.	ЛИТВИНОВ АЛЕКСАНДР РОМАНОВИЧ	заместитель руководителя Департамента аналитики по сегменту в области угольной, торфяной промышленности ФГБУ РЭА Минэнерго России
25.	ЮНГБЛЮДТ СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ	директор ФГАОУ ДПО «Петербургский энергетический институт повышения квалификации Министерства энергетики Российской Федерации»