

*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*

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук**

Санкт-Петербург – 2024

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

**Официальные оппоненты:**

*Левин Владимир Михайлович*

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», кафедра Автоматизированных электроэнергетических систем, заведующий кафедрой;

*Хренников Александр Юрьевич*

доктор технических наук, доцент, акционерное общество «Научно-технический центр Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы», управление организации научно-технического совета департамента НТС и научно-технической информации, учёный секретарь;

*Шишлянников Дмитрий Игоревич*

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», кафедра «Горная электромеханика», профессор.

**Ведущая организация** – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва.

Защита диссертации состоится **25 апреля 2024 г. в 14:00** на заседании диссертационного совета ГУ.6 Санкт-Петербургского горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, В.О., 21-я линия, д. 2, **аудитория № 3321**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан **25 января 2024 г.**

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



УСТИНОВ  
Денис Анатольевич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Электротехнические комплексы (ЭТК) горных и нефтегазовых предприятий (ГиНГП) являются ключевыми объектами энергетической инфраструктуры, которая, в свою очередь, служит опорой энергетической безопасности страны. 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 ЭТК 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 и структурных элементов ЭМО, не обнаруженных своевременно, приводят к внезапным остановкам, тяжелым авариям на производстве, угрозе безопасности персонала, а также значительным потерям энергии и ресурсов, что, учитывая жизненный цикл эксплуатации оборудования в 20 и более лет, приводит к угрозе нарушения 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. 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 выявления аварийных и

предаварийных режимов работы, а также неэффективного потребления энергии и экологического воздействия на этапе эксплуатации ЭМО.

Значимыми тенденциями, обусловленными нарастающими технологическими, экологическими, экономическими и социальными вызовами для ГиНПП, являются переход на производственные предприятия в рамках концепции Индустрии 4.0 и цифровая трансформация, ориентированные на цифровое представление данных. 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 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» (ЦД) открывает возможности повышения безопасности, энергоэффективности, экологичности и экономической эффективности эксплуатации ЭМО с учетом влияния множества факторов на всем протяжении использования оборудования в производстве. Отсутствие комплексных решений по применению цифровых технологий для ГиНПП, 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., Клюев 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 другие.

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.

Для достижения поставленной в диссертационной работе цели необходимо решить следующие **задачи**:

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 предаварийной работы, наличия развивающихся дефектов на ранней стадии, а также прогнозирования техниче-

ского 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.

#### **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.

**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 исследований** методы и средства обеспечения безопасности и эффективности эксплуатации, мониторинг, диагностика и оценка технического состояния электромеханического оборудования.

**Научная новизна работы:**

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 ГиНПП.

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 ГиНПП, 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 ГиНПП,

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 ГиНПП.

**Теоретическая и практическая значимость работы:**

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

2. 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.

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

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

5. 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.

6. 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.); Горный университет (акт утвержден 05.07.2023 г.); АО «Гипроцветмет» (акт утвержден 16.06.2023г.); ООО «Севзаптехника» (акт утвержден



08.06.2023 г.). АО «Готэк Северо-Запад» (акт утвержден 25.05.2023 г.).

На основании рассмотрения актов внедрения согласно протоколу заседания Научно-технического совета угольной промышленности Министерства энергетики РФ от 19.12.2023 № 12-130-пр результаты исследования признаны существенными для развития ТЭК и рекомендованы к использованию в текущей деятельности в рамках компетенций.

#### **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.

#### **На защиту выносятся следующие положения:**

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 энергети-

ческих 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 исследований** основывается на корректном использовании общепризнанных теорий, методов и подходов, адекватных математических моделей электромеханического оборудования, 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: 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»; 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»; IV Международная научно-практическая конференция «Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование», (октябрь 2021 года, г. СанктПетербург). Тема доклада: «Устойчивое развитие минерально-сырьевого комплекса на основе цифровых технологий»; 3-я Международная научная конференция «Устойчивое и эффективное использование энергии, воды и природных ресурсов» (апрель 2021 года, г. СанктПетербург). Тема доклада: «Роль цифровых технологий в энергосбережении на горном производстве»; 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»; Международная научно-практическая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME2018», 2018 г., г. Санкт-Петербург. Тема доклада: «Диагностические параметры асинхронного электропривода на основе вектора парка»; 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»; Международная научно-техническая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME2017», 2017 г., г. Санкт-Петербург. Тема доклада: «Применение технологии промышленного интернета вещей для управления жизненным циклом электромеханического оборудования»; 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.

### **Публикации**

Основные научные результаты в достаточной степени освещены в 52 печатных работах, 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 (далее – Перечень ВАК), в 27 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 8 патентов на изобретения, 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

### **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.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимость исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** раскрыта роль ЭМО в обеспечении технологических процессов, проведен анализ условий эксплуатации на ГиНГП. Проанализировано техническое состояние энергетической инфраструктуры, включая ЭТК ГиНГП, определены технологии и уровни

цифровой трансформации, обеспечивающие переход к интеллектуальной энергетике. Отмечается существенная роль ЭМО в структуре потребления энергии ЭТК. Проведен анализ существующих методов мониторинга и диагностики технического состояния ЭМО. Представлено обоснование необходимости перехода к ПСТОиР как средству повышения безопасности и эффективности.

**Во второй главе** проведен анализ факторов, обуславливающих рост потерь энергии, рассмотрены математические модели, устанавливающие связь наличия дефектов с ростом потерь и сокращением ресурса ЭМО. Представлены результаты имитационного моделирования системы электропривода при наличии дефектов обмотки статора. Разработана методология выполнения диагностики и оценки остаточного ресурса без останова и вывода из эксплуатации ЭМО на основе многофакторного анализа его эксплуатационных электрических параметров.

**В третьей главе** проведен анализ интеллектуальных алгоритмов и методов, применяемых для мониторинга, диагностирования и прогнозирования технического состояния ЭМО. Предложен комплекс алгоритмов обработки эксплуатационных данных и диагностических признаков для выявления повреждения и классификации режимов работы ЭМО.

**В четвертой главе** предложена структура и методология функционирования ЦД процесса управления жизненным циклом эксплуатации (ПУЖЦЭ) ЭМО, учитывающего взаимное влияние фактического состояния и энергетических потоков структурных элементов ЭТК. Разработана классификация структур сетей сбора и обработки первичной информации при реализации распределенной системы управления жизненным циклом эксплуатации. Предложена методика оценки рисков безопасной и эффективной эксплуатации. Проведено сценарное моделирование воздействия рисков на развитие ЭТК потребителей.

**В пятой главе** представлена взаимосвязанная структура программных модулей (сервисов) диагностики, прогнозирования состояния и оценки уровня энергоэффективности, обнаружения и восполнения недостающих данных работы ЭМО в составе ЦД. Разработана динамическая модель поведения ЭМО в узле нагрузки и реализован

алгоритм управления спросом на электроэнергию ЭМО с учетом технического состояния на примере автономного ЭТК. Представлены результаты применения средств дополненной реальности в составе сервиса для повышения безопасности и скорости обслуживания.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

**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.**

На основе критического анализа существующих методов мониторинга и диагностики технического состояния ЭМО, работающего в тяжелых условиях ГИПП без вывода оборудования в ремонт, выявлены преимущества, разработаны и апробированы методы, построенные на анализе связи механических и электрических дефектов ЭМО с изменениями мгновенных значений тока и напряжения и их спектрального состава.

Установлено, что при диагностике необходимо учитывать влияние параметров качества электрической энергии на энергетические характеристики ЭМО. На примере асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (АДКР) показано, что при коэффициенте несимметрии питающего напряжения по обратной последовательности в 2 % рост потерь достигает 10%, а при небалансе 6% потери возрастают до 50 %. Рост вклада высших гармонических составляющих 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.

Выявлено, что увеличение потерь и снижение КПД, вызванные наличием дефектов на начальной стадии развития, несмотря на то, что они отрицательно сказываются на энергетической эффективности, не приводят к остановке оборудования, что обуславливает длительное существование потерь. Наличие дефектов приводит к увеличению потерь, повышению температуры элементов и узлов, что вызывает их ускоренный износ и сокращение срока службы ЭМО,

также повышаются пульсация скорости и крутящего момента, появляются вибрации и шум в оборудовании.

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 моделирования обрыва стержней ротора (ОСР) выявлено, что повреждение одного стержня приводит к увеличению тока на 2 %, возникают дополнительные потери мощности до 1,5 %, что приводит к увеличению температуры обмотки на 1 %, при этом происходит 10 %-ная потеря ресурса АДКР (рисунок 1). При 6 сломанных стержнях ток увеличивается на 12 %, при этом не происходит отключения тепловой защиты, дополнительные потери мощности достигают 8 %-ного увеличения, при этом температура обмотки поднимается на 5 %, что сокращает срок службы двигателя на 45 %.

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, а когда его значение достигает 10 %, ресурс изоляции снижается вдвое (рисунок 2). Также начальная стадия повреждений приводит к увеличению времени пуска до 10 % и коэффициента пульсаций момента до 20 %, при данных условиях ЭМО технически удовлетворяет всем требованиям непрерывной безопасной работы, однако повреждения увеличивают риск внезапного останова машины.

Для анализа межвитковых замыканий, которые приводят к изменению параметров схемы замещения и, в результате, к изменению  $L_m$  было выполнено имитационное моделирование электропривода без управления и со скалярной системой управления, замкнутой по частоте вращения. Установлено, что снижение  $L_m$  на 10 % при нерегулируемом электроприводе приводит к увеличению в 2 раза времени разгона, снижение  $L_m$  на 20 % приводит к увеличению в ~5 раз времени разгона до номинальной скорости, при этом АД не может сформировать электромагнитный момент при максимальной нагрузке. Ухудшение механических и энергетических характеристик электропривода заключается в нарастающем, при возникновении дефекта, рассогласовании настроечных параметров регуляторов. На

примере проведенного имитационного моделирования показано, что применение эталонных моделей позволяет определить допустимые условия выполнения требуемых функций (поддержание частоты вращения, формирование электромагнитного момента). Совмещение экспериментальных данных и результатов моделирования позволяет выполнить исследования в условиях небезопасной работы оборудования и оценить результаты воздействия на систему управления электропривода.

С учетом влияния на остаточный ресурс параметров питающей сети, условий эксплуатации и технического состояния элементов ЭМО доказана 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. Применительно к специфике ГиНГП выделены четыре уровня для оценки безопасности эксплуатации, характеризующие возможность возникновения аварии на основе отклонения значений индикаторов от пороговых значений.

Анализ электромагнитного момента проводится как по величине, так и по суммарному коэффициенту пульсации (1):

$$\Sigma K_{Me} = \sqrt{(\sum_{n=2}^{n=\infty} M_{(n)}^2 + \sum_{q=1}^{q=\infty} \sum_{p=1}^{p=\infty} M_{(qp)}^2)} / M_{av} + \sqrt{\sum_{i=2}^{i=\infty} M_{(di)}^2} / M_{av} = K_{Me(n)} + K_{Me}^* \quad (1)$$

где  $K_{Me(n)}$  – коэффициент пульсаций электромагнитного момента, определяемый типом и структурой силового преобразователя частоты, о.е.;  $M_{av}$  – среднее значение электромагнитного момента АД, Н·м;  $K_{Me}^*$  – коэффициент пульсаций электромагнитного момента, определяемый наличием и уровнем дефекта АД и ИМ, о.е.

При анализе изменений потребляемой электрической мощности рассматриваются дополнительные потери во всех элементах ЭМО поскольку значение потерь увеличивается при той же нагрузке при наличии дефектов. За показатель технического состояния принят коэффициент изменения потерь, равный разнице относительных потребляемых ЭМО мощностей при определенной нагрузке (2):



$$\Delta\rho(P_2) = \frac{(P_{1\text{нач}} - P_{1\text{тек}})}{P_{1\text{нач}}}, \quad (2)$$

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.

При проведении частотного анализа (тока, напряжения и мощности) выявляется вид неисправности, который приводит к увеличению потерь мощности. При частотном анализе рассчитываются потери мощности на частотах в спектре, которые характеризуют величину повреждения, среднеквадратичное значение (СКЗ) и пик-фактор в пределах диапазона, которые характеризуют вид повреждения. Численно спектрограммы мгновенной потребляемой мощности оцениваются обобщенным показателем – коэффициентом гармонического искажения мощности.

В качестве критерия для оценки энергетических процессов в ЭД, обладающим неравномерным полем в воздушном зазоре и, как следствие, имеющим полигармонический состав спектра токов и напряжений, применяется понятие динамического коэффициента мощности (3), который характеризует общее состояние диагностируемого ЭМО, т.к. позволяет оценить соотношение мощности спектра сигнала к полезной мощности и соответствующее им влияние искажений на энергетические показатели.

$$K_{ЭП} = \eta \cdot K_M \cdot K_{И}, \quad (3)$$

где  $\eta$  – коэффициент полезного действия электрической машины;  $K_M$  – средний коэффициент мощности (4);  $K_{И}$  – коэффициент искажений (5).

$$K_M = \frac{\sum_{k=1}^m \int_0^{\omega_{\max}} P_k(\omega) d\omega}{\sum_{k=1}^m \sqrt{\int_0^{\omega_{\max}} U_k^2 d\omega} \sqrt{\int_0^{\omega_{\max}} I_k^2 d\omega}}, \quad (4)$$

где  $U_{nk}$  – напряжение  $n$ -ной гармоники  $k$ -ой фазы двигателя, В;  $I_{nk}$  – ток  $n$ -ной гармоники  $k$ -й фазы двигателя, А;  $P_k(\omega)$  – составляющая мгновенной мощности, приходящаяся на частоту  $\omega$ .

$$K_{И} = \frac{P_{20}}{P_{2\text{нестин}}} = \frac{\eta_{\text{ном}} P_{2\text{ном}}}{\eta \sum_{k=1}^m \int_0^{\omega_{\max}} P_k(\omega) d\omega}, \quad (5)$$

где  $P_{20}$  – мощность основной гармоники поля, Вт;  $P_{2ном}$  – мощность на валу в номинальном режиме;  $P_{2несин}$  – суммарная мощность искажений, создаваемых высшими гармониками, включая основную, Вт;  $\eta_{ном}$  – номинальный коэффициент полезного действия ЭМО. Коэффициент искажений характеризует отношение полезной мощности ЭД при реальном поле в зазоре к полезной мощности при синусоидальном поле в зазоре (для идеального ЭД).

Для оценки остаточного ресурса применяется величина энерго-ресурса  $J$ , определяемая приведенной величиной потерь в агрегате за время до перехода его в предельное состояние (6, 7).

$$J = \sum_{i=1}^N K_{пер i} \left[ \sum_{k=1}^M K_{вг.k} (\omega_k) \rho(\omega_k) \right] \Delta t_i. \quad (6)$$

$$T_{р.ост} = \left( 1 - \frac{J_0}{J_{ном}} \right) T_{р.ном} \sum_{i=1}^N K_{пер i} \left[ \sum_{k=1}^M K_{вг.k} (\omega_k) \rho(\omega_k) \right] \Delta t_i, \quad (7)$$

где  $T_{р.ном}$  – номинальный технический ресурс;  $K_{пер}$  – перегрузочный коэффициент при  $i$ -ом замере;  $\rho_i$  – приведенные потери при  $i$ -ом замере;  $\Delta t_i$  – время между замерами;  $J$  – энергоресурс;  $\rho_{ik}(\omega_k)$  –  $k$ -я гармоническая составляющая в спектре потерь;  $M$  – число анализируемых гармоник спектра;  $K_{вг.k}$  – весовые коэффициенты, учитывающие значимость  $k$ -й гармоники спектра.

Появление неисправностей в элементах и в узлах приводных механизмов, также диагностируется посредством анализа электрических параметров. Разработан метод диагностики конструкторских узлов мельницы, позволяющий идентифицировать динамическое состояние и состояние износа футеровки мельницы и ее лифтеров (рисунок 3). Влияние таких факторов, как износ футеровки, износ мельющих тел и изменение физико-механических свойств руды возможно отследить с помощью эталонов (спектров электромагнитного момента) при цифровом моделировании процесса измельчения (рисунок 4). Алгоритмы DEM-моделирования строятся на вычислении нормальной и тангенциальной составляющих сил взаимодействия пар: частица-частица и частица-граница объекта симуляции.

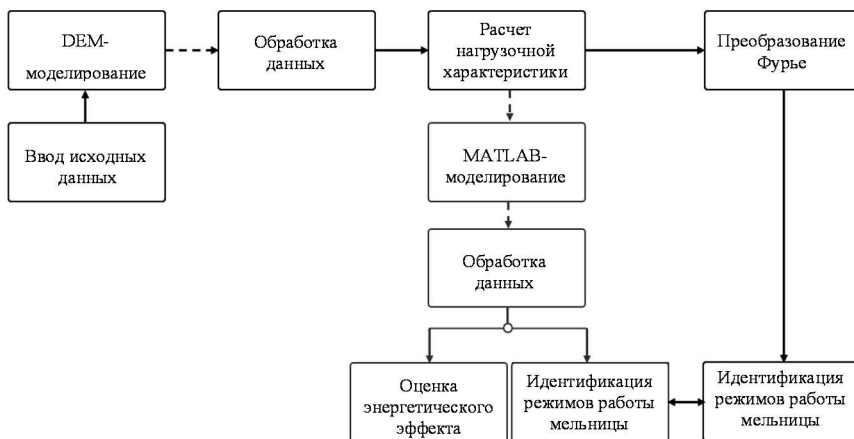


Рисунок 3 – Метод формирования эталонных спектров предельного состояния приводного механизма

Таким образом, комплексная структура диагностики и мониторинга (рисунок 5) на основе интеграции информации о режимах работы, эталонных параметрах, диагностических признаков, извлекаемых из электрических сигналов, позволяет идентифицировать широкий перечень неисправностей, что обеспечивает повышение эффективности диагностики в части точности, быстродействия с выявлением вида дефекта и возможностью оценки технического состояния и ресурса.

**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.**

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).

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 (рисунок 6). Данные алгоритмы используются для оценки совокупного фактического состояния элементов в узлах ЭМО, представленных в виде лепестковых диаграмм, необходимых для последующего анализа и прогнозирования развития дефектов (рисунок 7).

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.

Разработан метод оценки вероятности безотказной работы на основе определения величины остаточного ресурса 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*).

Определение вероятности безотказной работы АДКЗ на основе базы ретроспективных данных при требованиях к пределу доверительного интервала прогнозирования  $\lambda$  при  $p \geq 95\%$  – менее 5% можно представить как построение функции (8):

$$P = \left( t, \Delta t, n, k, l, N_i, P_i(t), P(t - \Delta t), \dots, P_{im}(m_i), P_i(t - n\Delta t), \dots, P_{ih}(h_i), P_{ih}(t - n\Delta t) \right), \quad (8)$$

где  $P_i$  – прогноз вероятности;  $t$  – текущий момент времени;  $\Delta t$  – интервал времени между измерениями;  $\lambda$  – 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.

Величина остаточного ресурса с учетом работы ИНС (9):

$$\delta = K_1 \cdot P_{ih}(h) + K_2 \cdot P_{im}(m) + K_3 \cdot P_{ih}(h) + K_4 \cdot P_{im}(m) = K_1 \cdot F\left(\sum_{i=1}^{17} \Delta w_{ij} \cdot x_{ij} - \Delta \theta_j\right) + K_2 \cdot F\left(\sum_{i=1}^{17} \Delta w_{ij} \cdot x_{ij} - \Delta \theta_j\right) + K_3 \cdot F\left(\sum_{i=1}^{21} \Delta w_{ij} \cdot x_{ij} - \Delta \theta_j\right) + K_4 \cdot F\left(\sum_{i=1}^{21} \Delta w_{ij} \cdot x_{ij} - \Delta \theta_j\right), \quad (9)$$

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 (10):

$$\Delta w_{ij} = \varepsilon(d_j^s - y_j^s) \cdot x_{ij}, \quad \Delta \theta_j = -\varepsilon(d_j^s - y_j^s), \quad (10)$$

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  $d_s$ ;  $\varepsilon$  – скорость обучения ИНС. Результатом работы алгоритма является диаграмма вероятностного технического состояния, представленная на рисунке 8.

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 (рисунок 9). 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.

Таблица 1 – Функциональные свойства разработанных алгоритмов для ПСТОиР

Название алгоритма	Определение ранней стадии дефекта	Определение критической стадии дефекта	Прогнозирование остаточного ресурса
Поиск частотных составляющих	+	+	-
Оценки состояний ЭМО	+	+	-
Программный датчик для обнаружения повреждений	+	+	-
Обнаружение повреждений на ранней стадии	+	+	-
Определение группового состояния электропривода в узлах нагрузки	+	+	-
Управление режимами на основе нейросетевого диагностирования неисправностей и ТС	-	-	+
Вероятностный метод оценки технического состояния	-	-	+
Разложение временных рядов	+	+	-

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, позволяющий в реальном времени мониторинга обнаруживать дефекты подшипников с точностью более 95%.

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 (рисунок 10).

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. 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.**

В качестве обобщения сформирована концепция перехода к управлению жизненным циклом эксплуатации ЭМО на основе цифровых технологий и определены этапы перехода ТОиР (рисунок 11). Предлагаемая структура этапов ориентирована на постоянное совершенствование и динамическую адаптацию управляющих воздействий. Структура различает три уровня управления: нормативный, стратегический и оперативное управление. Ориентация на динамическую стратегию фокусируется на предотвращении отказов за счет ранней идентификации дефектов (повышение ремонтпригодности), ПСТОиР, а также анализа энергетической и экологической эффективности.

Функциональные свойства ЦД процесса управления техническими воздействиями базируются на проведенных исследованиях и

предложенных алгоритмах по оценке и прогнозированию остаточного ресурса и комплекса показателей, которые отражают взаимное влияние условий эксплуатации и технического состояния оборудования, а также дополнительные потери энергии, которые обусловлены появлением влияющих факторов.

Система энергообеспечения, электрический привод и связанный с ним исполнительный механизм на объектах ГиНГП являются ключевым звеном для формирования архитектуры и методологических подходов создания ЦД для управления безопасной и эффективной эксплуатацией (рисунок 12). Учитывая предложенную структуру, внимание уделяется построению архитектур и алгоритмов, которые реализуются в форме сервисов, образующих ЦД в части технологической цепочки жизненного цикла энергии: первичная энергия – генерация – система электроснабжения – ЭМО – технологический процесс или объект воздействия. Для реализации ЦД разработана классификация структур сетей сбора и обработки первичной информации при реализации распределенной системы управления жизненным циклом эксплуатации ЭМО, отличающаяся учетом ранжирования сценариев обмена данными, уровня тяжести последствий аварий и уровня цифровизации электротехнических комплексов.

ЦД реализует оценку энергетической составляющей и определение не продуктивных затрат при эксплуатации ЭМО в ЭТК ГиНГП на основе данных, полученных информационными сервисами. Данная оценка позволяет определить уровень энергоэффективности эксплуатируемого ЭМО и ЭТК в целом для управления энергоэффективностью на этапе эксплуатации. Прогнозирование уровня энергоэффективности позволяет управлять мероприятиями по энергосбережению, формированию планов и программ по повышению энергетической эффективности ЭМО на основе обобщающей модели потребления, привязанной к схеме электроснабжения.

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. На примере ЭТК НГДП определены риск нарушения показателей энергоэффективности и надежности эксплуатации АД ПДД на основе анализа неблагоприятных событий и сценарных условий изменения электропотребления от времени в изменяющихся условиях эксплуатации. Проведен анализ вероятности возникновения дефектов для АД поддержания пластового давления (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 для оценки рисков для трех сценариев эксплуатации ЭТК (рисунок 13).

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, как в зависимости от роста потерь электроэнергии, так и от вероятности возникновения дефектов для анализируемых АД ПДД.

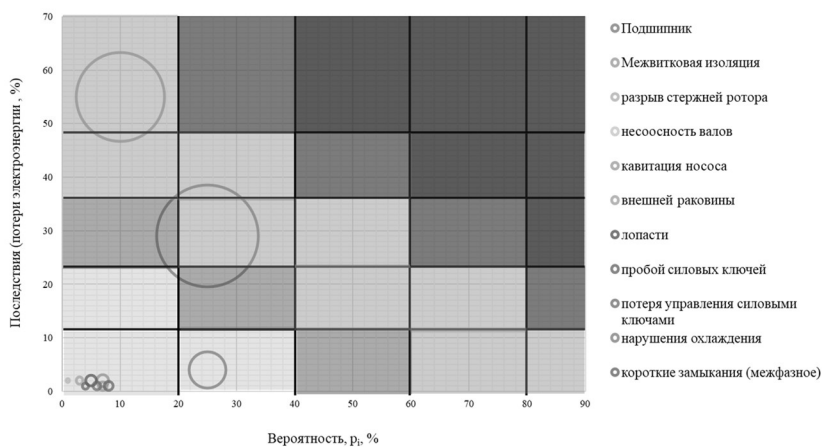


Рисунок 13 – Изменение потерь электроэнергии от вероятности возникновения дефектов ЭМО и величины риска (диаметр кружков), на начальном этапе эксплуатации ЭТК и сценарий изменения электрической нагрузки – приработка

Предложена модель оценки стоимости жизненного цикла эксплуатации (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  $CO_2$ , 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 (11).

$$СЖЦЭ_{ЭМО} = -I - (E_M + E_{MTC} + E'_L + E'_{LTC}) \cdot p_E \cdot k_{p1} - C_{MRO} \cdot \\ -(E_{CO2} + E_{CO2TC}) \cdot p_{CO2} - C_D + V_R, \quad (11)$$

где  $I$  – 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.

С учетом моделирования влияния компонентного состава ЭМО повышение энергетической эффективности в цикле эксплуатации на 0,3 % способствует снижению эквивалентных выбросов до 10 %. Воздействие на потери, обусловленные наличием дефектов, является действенной мерой, 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. 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. Прогнозирование времени ремонта, извлечения материалов, замены деталей и переработки способствует снижению эквивалентных выбросов. Управление эксплуатацией ЭМО на основе эквивалентных выбросов позволяет оказать влияние по всей цепочке жизненного цикла ЭМО.

Разработана методология сценарного моделирования воздействия рисков на развитие ЭТК потребителей, позволяющая оценивать изменение спроса на энергетические ресурсы и отличающаяся учётом влияния конкурентного распределения энергетических ресурсов и оценки изменения свойств ЭТК на жизненном цикле эксплуатации при влиянии технологических изменений. Методология включает в себя следующие этапы: первоначально проводится обзор региона – текущее состояние энергосистемы и энергетической инфраструктуры, исследование ресурсной базы, топливно-энергетического баланса, 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. На рисунке 14 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, проведенный на основе 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  $B_{vppn}$  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.

Предложена сценарная модель, позволяющая оценить необходимые технологические изменения, которые могут повлиять на свойства инфраструктуры, а также, учитывая коэффициенты влияния свойств инфраструктуры на риски эксплуатации ЭМО в составе ЭТК ГиНПП, обобщенно прогнозировать риски на этапе эксплуатации ЭМО с учетом развития технологических блоков и глобальных вызовов (рисунок 15).

Обобщенная карта определения технических воздействий по видам структурных компонент ЭТК и критериям принятия решений представлена на рисунке 16.

**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.**

Для построения распределенной системы управления ЖЦЭ ЭМО необходима взаимосвязанная структура сервисов, реализующих 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 (рисунок 17). Комплекс рассмотренных сервисов, образующих ЦД процесса управления безопасной и эффективной эксплуатацией ЭМО представлен в таблице 2.

На примере узла питания нагрузки системы электроснабжения, построена динамическая модель 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 ЦД

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.

Таблица 2 - Эффекты и средства реализации комплекса сервисов, образующих ЦД

<b>Сервисы</b>	<b>Эффекты</b>
Сбор первичных данных для анализа диагностических параметров	Увеличение доступности данных
Мониторинг диагностических параметров	Снижение рисков аварий, повышение безопасности, снижение количества внезапных остановок
Прогнозирование развития дефектов	Снижение числа поломок, снижение затрат на ТОиР
Обнаружения аномалий и пополнения базы данных	Повышение эффективности диагностики, повышение качества прогнозирования ТС
Формирования синтетических данных	Повышение качества прогнозирования, уменьшение времени интеграции алгоритмов
Обнаружение ранней стадии развития дефектов	Повышение качества прогнозирования, снижение затрат энергии, вредных выбросов, затрат на ТОиР
Обнаружение и восполнение недостающих данных	Повышение качества прогнозирования
Формирование цифровых моделей	Повышение качества прогнозирования
Дополненной реальности	Повышение качества, безопасности и снижение времени ТОиР

Реализован сервис управления спросом на электроэнергию ЭМО с учетом технического состояния на примере автономного ЭТК с ВИЭ (возобновляемыми источниками энергии), 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%. На основе прогнозируемых графиков мощности нагрузки и генерации происходит

распределение спроса на основе генетического алгоритма. При распределении мощность нагрузки, не использующая ВИЭ, составила 62,8 кВт·ч, а без управления спросом 64 кВт·ч.

На основе лабораторных испытаний доказана эффективность применения средств дополненной реальности в составе сервиса для повышения безопасности и скорости обслуживания оборудования и построения взаимодействия человека с ЦД. 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 ГиНПП.

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 ГиНПП. 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 ГиНПП,

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, повышающие 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 ГиНГП, 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 производственной деятельности ряда компаний при сервисном обслуживании и ремонте, для определения потерь и эквивалента вредных выбросов, обусловленных техническим состоянием ЭМО, а также при построении цифровых моделей и оценке рисков безопасной эксплуатации ЭМО с учетом сценарных условий.



В работе выделен ряд аспектов для развития темы и проведения дополнительных исследований, включая развитие интеграции информационных потоков, системы управления эксплуатацией ЭМО с прогностическими алгоритмами управления ЭМО.

#### **СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК:*

1. Козярук, А.Е. Система мониторинга и оценки остаточного ресурса силового электрооборудования / А.Е. Козярук, **Ю.Л. Жуковский**, А.А. Коржев, А.В. Кривенко // Записки Горного института. – 2008. – Т. 178. – С. 17–21. (ВАК, ред. Перечня от 24.04.2008).

2. 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. 31–34. (ВАК, ред. Перечня от 24.04.2008)

3. **Жуковский, Ю.Л.** Диагностика и оценка остаточного ресурса электромеханического оборудования, работающего в тяжелых условиях, по электрическим параметрам / **Ю.Л. Жуковский**, А.А. Коржев, А.Е. Козярук, А.В. Кривенко // Записки Горного института. – 2011. – Т. 192. – С. 162–167. (ВАК № 784, ред. 25.02.2011)

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. (ВАК № 2001, ред. 25.02.2011).

5. **Жуковский, Ю.Л.** Внедрение системы энергосбережения и энергоэффективности на предприятиях цветной металлургии / **Ю.Л. Жуковский**, Е.В. Сизякова // Записки Горного института. – 2013. – Т. 202. – С. 155–160. (ВАК № 849, ред. 01.12.2013)

6. 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. (ВАК № 719, ред. 01.12.2013)

7. 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. (ВАК № 719, ред. 30.11.2015).

8. **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. (ВАК № 1619, ред. 30.11.2015).

9. 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 // Электротехнические системы и комплексы. – 2017. – №. 3 (36). – С. 47–54. (ВАК № 1851, ред. 13.04.2017).

10. **Жуковский, Ю.Л.** Оценка технического состояния и остаточного ресурса электромеханического агрегата с асинхронным двигателем / **Ю.Л. Жуковский**, Королев Н.А., Бабанова И.С. // Горное оборудование и электромеханика. – 2017. – №. 6. – С. 20–25. (ВАК № 507, ред. 02.10.2017)

11. **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. (ВАК № 899, ред. 20.07.2022)

*Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:*

12. Shabalov, M.Y. The influence of technological changes in energy efficiency on the infrastructure deterioration in the energy sector / Shabalov M.Y., **Zhukovskiy Y.L.**, Buldysko A.D., Gil B., Starshaia V.V. // Energy Reports, 2021, 7, pp. 2664–2680, DOI 10.1016/j.egy.2021.05.001

13. Koteleva, N.I. A soft sensor for measuring the wear of an induction motor bearing by the park's vector components of current and voltage / Koteleva N.I., Korolev N.A., **Zhukovskiy Y.L.**, Baranov G. // *Sensors*, 2021, Volume 21(23), pp. 7900. DOI 10.3390/s21237900
14. Lavrik, A.Y. Optimizing the size of autonomous hybrid microgrids with regard to load shifting / Lavrik A.Y., **Zhukovskiy Y.L.**, Tsvetkov P.S. // *Energies*, 2021, Volume 14(16), pp. 5059. DOI: 10.3390/en14165059
15. **Zhukovskiy, Y.L.** Fossil energy in the framework of sustainable development: Analysis of prospects and development of forecast scenarios / **Zhukovskiy Y.L.**, Batueva D.E., Buldysko A.D., Gil B., Starshaia V.V. //, 2021, 14(17), 5268, DOI 10.3390/en14175268.
16. Koteleva, N.I. Identification of the technical condition of induction motor groups by the total energy flow / Koteleva N.I., Korolev N.A., **Zhukovskiy Y.L.** // *Energies*, 2021, Volume 14(20), pp. 6677. DOI: 10.3390/en14206677
17. **Zhukovskiy, Y.L.** Scenario modeling of sustainable development of energy supply in the Arctic / **Zhukovskiy Y.**, Buldysko A., Malkova Y., Koshenkova A., Stoianova A., Tsvetkov P. // *Resources*, 2021, Volume 10(12), pp. 124. DOI: 10.3390/resources10120124
18. **Zhukovskiy, Y.L.** Assessment of the Impact of Technological Development and Scenario Forecasting of the Sustainable Development of the Fuel and Energy Complex / **Zhukovskiy Y.**, Koshenkova A., Vorobeva V., Rasputin D., Pozdnyakov R. // *Energies*, 2023, Volume 16(7), pp. 3185. DOI: 10.3390/en16073185
19. **Zhukovskiy, Y.L.** Induction Motor Bearing Fault Diagnosis Based on Singular Value Decomposition of the Stator Current / **Zhukovskiy Y.**, Buldysko A., Revin I. // *Energies*, 2023, Volume 16(8), pp. 3303. DOI: 10.3390/en16083303
20. Lavrik, A.Y. Potential for electric consumption management in the conditions of an isolated energy system in a remote population / Lavrik A.Y., Vasilkov O.S., Semenyuk A.V., **Zhukovskiy Y.L.** // *Sustainable Development of Mountain Territories*, 2020, Volume 12, pp. 583–591. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-4-583-591
21. **Zhukovskiy, Y.L.** Blockchain-based digital platforms to reduce the carbon footprint of mining. Mining informational and analytical

bulletin / **Zhukovskiy Y.L.**, Semenyuk A.V., Alieva L.Z., Arapova E.G. // 2022, Volume (6-1), pp. 361–378. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_61\_0\_361

22. **Zhukovskiy, Y.L.** Monitoring of grinding condition in drum mills based on resulting shaft torque / **Zhukovskiy Y.L.**, Korolev N.A., Malkova Y.M. // Journal of Mining Institute, 2022, Volume 256, pp. 686–700. DOI: 10.31897/PMI.2022.95

23. **Zhukovskiy, Y.L.** About increasing informativity of diagnostic system of asynchronous electric motor by extracting additional information from values of consumed current parameter / **Zhukovskiy Y.L.**, Korolev N.A., Koteleva N.I. // Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, 2018, Volume 1015, Issue 3, pp. 032158. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032158

24. **Zhukovskiy, Y.L.** Diagnostics and evaluation of the residual life of an induction motor according to energy parameters / **Zhukovskiy Y.L.**, Koteleva N.I. // Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, 2018, Volume 1050, Issue 1, pp. 012106, DOI: 10.1088/1742-6596/1050/1/01210

25. **Zhukovskiy, Y.L.** The development and use of diagnostic systems and estimation of residual life in industrial electrical equipment / **Zhukovskiy Y.L.**, Vasilev B.Y. // International Journal of Applied Engineering Research, 2015, Volume 10, no. 20, pp. 41150–41155. DOI: 41150-41155

26. **Zhukovskiy, Y.L.** A method of definition of life-cycle resources of electromechanical equipment / **Zhukovskiy Y.L.**, Koteleva N.I. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, 2016, Volume 124, Issue 1, p. 012172. DOI: 10.1088/1757-899X/124/1/012172

27. **Zhukovskiy, Y.L.** Automated system for definition of life-cycle resources of electromechanical equipment / **Zhukovskiy Y.L.**, Koteleva N.I. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, 2017, Volume 177, Issue 1, pp. 012014. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012014

28. **Zhukovskiy, Y.L.** The probability estimate of the defects of the asynchronous motors based on the complex method of diagnostics /

**Zhukovskiy Y.L.**, Korolev N.A., Babanova I.S., Boykov A.V. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing, 2017, Volume 87, Issue 3, pp. 032055. DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032055.

29. **Zhukovskiy, Y.L.** The prediction of the residual life of electromechanical equipment based on the artificial neural network / **Zhukovskiy Y.L.**, Korolev N.A., Babanova I.S., Boykov A.V. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing, 2017, Volume 87, Issue 3, pp. 032056. DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032056

30. **Zhukovskiy, Y.L.** Method of Data storing, collection and aggregation for definition of life-cycle resources of electromechanical equipment / **Zhukovskiy Y.L.**, Koteleva N.I. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing, 2017, Volume 87, Issue 3, pp. 032057. DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032057

31. **Zhukovskiy, Y.L.** Quality estimation of continuing professional education of technical specialists / **Zhukovskiy Y.L.**, Vasilev B.Y., Koteleva N.I. // International Conference “Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies” (IT&QM&IS), IEEE, 2017, pp. 704–707. DOI: 10.1109/ITMQIS.2017.808592

32. **Zhukovskiy, Y.L.** Development of augmented reality system for servicing electromechanical equipment / **Zhukovskiy Y.L.**, Koteleva N.I. // Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, 2018, Volume 1015, Issue 4, pp. 042068. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/4/042068

33. **Zhukovskiy, Y.L.** Concept of Smart Cyberspace for Smart Grid Implementation / **Zhukovskiy Y.L.**, Malov D.A. // Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, 2018, Volume 1015, Issue 4, pp. 042067. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/4/042067

34. **Zhukovskiy, Y.L.** Analysis of technological changes in integrated intelligent power supply systems / **Zhukovskiy Y.L.**, Starshaia V.V., Batueva D.E., Buldysko A.D. // Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects. Proceedings of the 11th Russian-German Raw Materials Conference, November 7–8, 2018, Volume 1, pp. 249–258. Potsdam, Germany

35. **Zhukovskiy, Y.L.** Electrical equipment maintenance system with elements of augmented reality technology / **Zhukovskiy Y.L.**, Koteleva N.I. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,

IOP Publishing, 2019, Volume 643, Issue 1, pp. 012024. DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012024

36. Korolev, N.A. Problems of diagnostics of asynchronous motor powered by an autonomous voltage inverter / Korolev N.A., Solovyev S.V., **Zhukovskiy Y.L.** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, 2019, Volume 643, Issue 1, pp. 012022. DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012022

37. **Zhukovskiy, Y.L.** Energy demand side management in stand-alone power supply system with renewable energy sources / **Zhukovskiy Y.L.**, Lavrik A.Y., Buldysko A.D. // Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, 2021, Volume 1753, Issue 1, pp. 012059. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012059

38. Koteleva, N.I. Augmented reality technology as a tool to improve the efficiency of maintenance and analytics of the operation of electromechanical equipment / Koteleva N.I., **Zhukovskiy Y.L.**, Valnev V.V. // Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, 2021, Volume 1753, Issue 1, pp. 012058. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012058

*Публикации в прочих изданиях:*

39. **Жуковский Ю.Л.** Диагностика и оценка остаточного ресурса электромеханического оборудования машин и механизмов (научная монография) / **Жуковский Ю.Л.**, Коржев А.А., Козярук А.Е., Кривенко А.В., Бабурин С.В., Черемушкина М.С. Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», СПб. – 2013. – 90 с.

40. **Жуковский Ю.Л.** Диагностика и оценка остаточного ресурса электромеханического оборудования машин и механизмов. Доклады научно-методического семинара «Методы и средства наладки электроприводов». Изд.: МЭИ, Москва. – 2014. – С. 34–47

*Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:*

41. Патент на изобретение № 2425390 Российская Федерация. МПК G01R31/34 (2006.01). Способ диагностики и оценки остаточного ресурса электроприводов переменного тока: № 2009142097/28: заявл. 16.11.2009; опубл. 27.07.2011 / Козярук А.Е., **Жуковский Ю.Л.**, Бабурин С.В., Коржев А.А., Васильева Е.Е.; заявитель «Санкт-Петербургский государственный горный институт имени Г.В. Плеханова». – 6 с.: ил.

42. Патент на изобретение № 2425391 Российская Федерация. МПК G01R31/34 (2006.01). Способ диагностики технического состояния электродвигателя по его электрическим параметрам: № 2009142082/28: заявл. 16.11.2009: опубл. 27.07.2011 / Козярук А.Е., **Жуковский Ю.Л.**, Черемушкина М.С., Коржев А.А., Кривенко А.В.; заявитель «Санкт-Петербургский государственный горный институт имени Г.В. Плеханова». – 5 с.

43. Патент на изобретение № 2505917. МПК H02P9/02 (2006.01) дата публикации 27.01.2014. Патент № 2505917 Российская Федерация, МПК H02P 9/02 (2006.01). Система автономного электропитания: 2012146725/07; заявл. 01.11.2012: опубл. 27.01.2014 / Абрамович Б.Н., **Жуковский Ю.Л.**, Сычев Ю.А.; заявитель НМСУ «Горный». – 8 с.: ил.

44. Патент на изобретение № 2532762 Российская Федерация. МПК G01R/34 (2006.01). Способ диагностики и оценки остаточного ресурса электроприводов переменного тока: № 2013135607/28: заявл. 29.07.2013: опубл. 10.11.2014 / **Жуковский Ю.Л.**, Таранов С.И.; заявитель НМСУ «Горный». – 7 с.: ил.

45. 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: № 2017614351; заявл. 27.02.2017; зарегистр. 12.04.2017; опубл. 12.04.2017 / **Жуковский Ю.Л.**, Королёв Н.А.; заявитель «Санкт-Петербургский горный университет». – 2 с.

46. Патент № 2626231 Российская Федерация, МПК G01R 31/34 (2006.01). Способ диагностики технического состояния и оценки остаточного ресурса электромеханического агрегата с асинхронным двигателем: № 2016144271: заявл. 10.11.2016: опубл. 24.07.2017 / **Жуковский Ю.Л.**, Королёв Н.А., Бабанова И.С.; заявитель «Санкт-Петербургский горный университет». – 16 с.: ил.

47. Патент № 2648413 Российская Федерация, МПК G05B 13/02 (2006.01), G06N 3/02 (2006.01), G05B 19/00 (2006.01). Способ управления режимами на основе нейросетевого диагностирования неисправностей и технического состояния электроприводного газоперекачивающего агрегата: № 2017101942: заявл. 20.01.2017: опубл.

27.03.2018 / **Жуковский Ю.Л.**, Королёв Н.А., Бабанова И.С.; заявитель «Санкт-Петербургский горный университет». – 16 с.: ил.

48. Патент № 181087 Российская Федерация, МПК G01R 31/34 (2006.01). Устройство диагностики двигателей переменного тока с преобразователем частоты: № 181087; заявл. 19.10.2017; опубл. 04.07.2018 / **Жуковский Ю.Л.**, Королёв Н.А. Васильев Б.Ю.; заявитель «Санкт-Петербургский горный университет» – 8 с.: ил.

49. 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.

50. Патент № 2727386 С1 Российская Федерация, МПК G01R 31/34 (2006.01). Устройство диагностики и оценки остаточного ресурса электродвигателей: № 2019134080; заявл. 23.10.2019; опубл. 21.07.2020 / Королёв Н.А., Васильев Б.Ю., **Жуковский Ю.Л.**, Желтиков Н.О.; заявитель «Санкт-Петербургский горный университет». – 9 с.

51. 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 / **Жуковский Ю.Л.**, Белоглазов И.И., Николаев М.Ю.; заявитель «Санкт-Петербургский горный университет». – 1 с.

52. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023660650 Российская Федерация. Программа распознавания наличия дефекта подшипника асинхронного двигателя: № 2023660650; заявл. 19.04.2023; опубл. 23.05.2023 / **Жуковский Ю.Л.**, Булдыско А.Д.; заявитель «Санкт-Петербургский горный университет». – 1 с



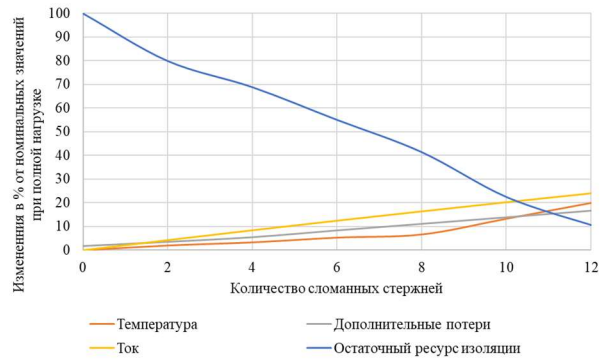


Рисунок 1 – Ресурс изоляции в зависимости от количества поврежденных стержней ротора АДКР, увеличения тока статора, потерь мощности и температуры

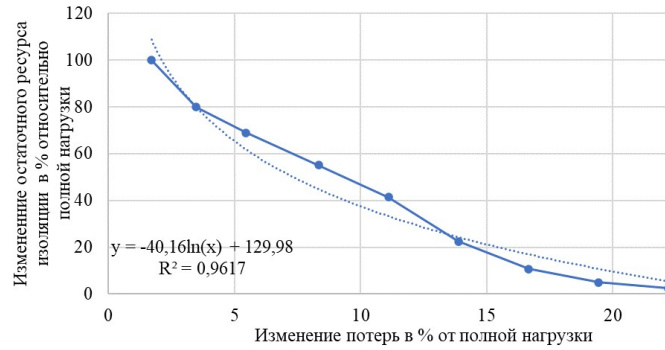


Рисунок 2 – Снижение срока службы изоляции в зависимости от роста дополнительных потерь, обусловленных наличием повреждений

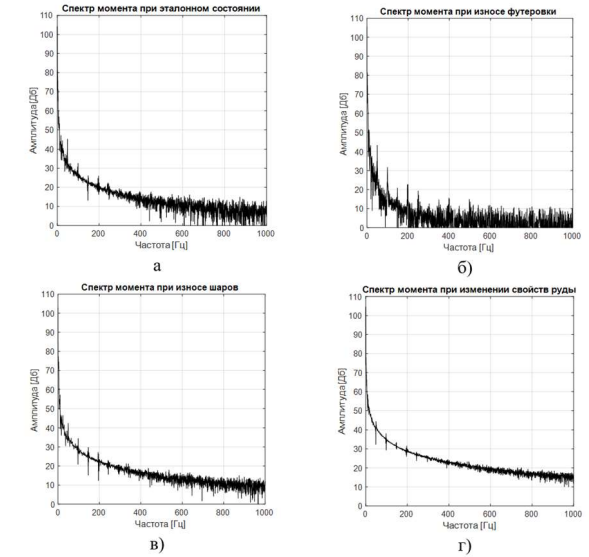


Рисунок 4 – Спектры электромагнитного момента при разном состоянии мельницы: а) при эталонном состоянии; б) при износе футеровки; в) при износе шаров; г) при изменении свойств руды

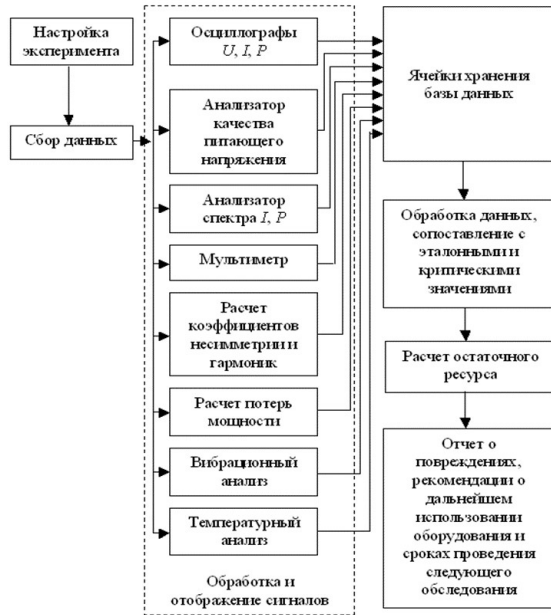


Рисунок 5 – Обобщенная структура диагностики ЭМО

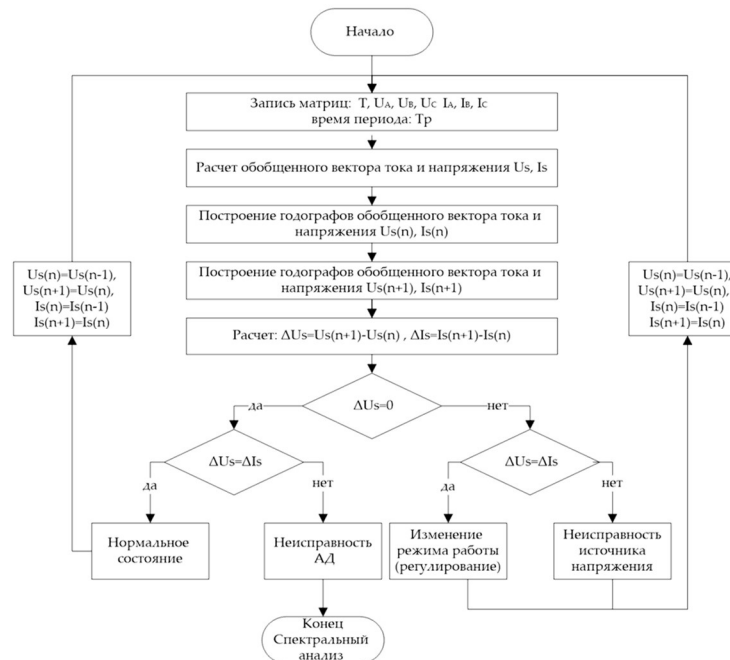


Рисунок 6 – Алгоритм поиска дефектов по обобщенным годографам тока и напряжения АДКР



Рисунок 7 – Диаграмма технического состояния: неисправное состояние



Рисунок 8 – Диаграмма вероятностного технического состояния: кризисное состояние ЭМО

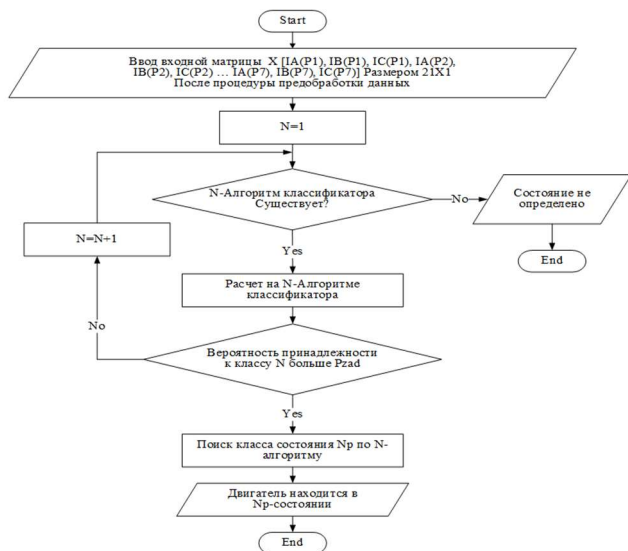


Рисунок 9 – Алгоритм ансамблированного обучения при определении режимов работы и диагностики состояния группы ЭМО в узле нагрузки

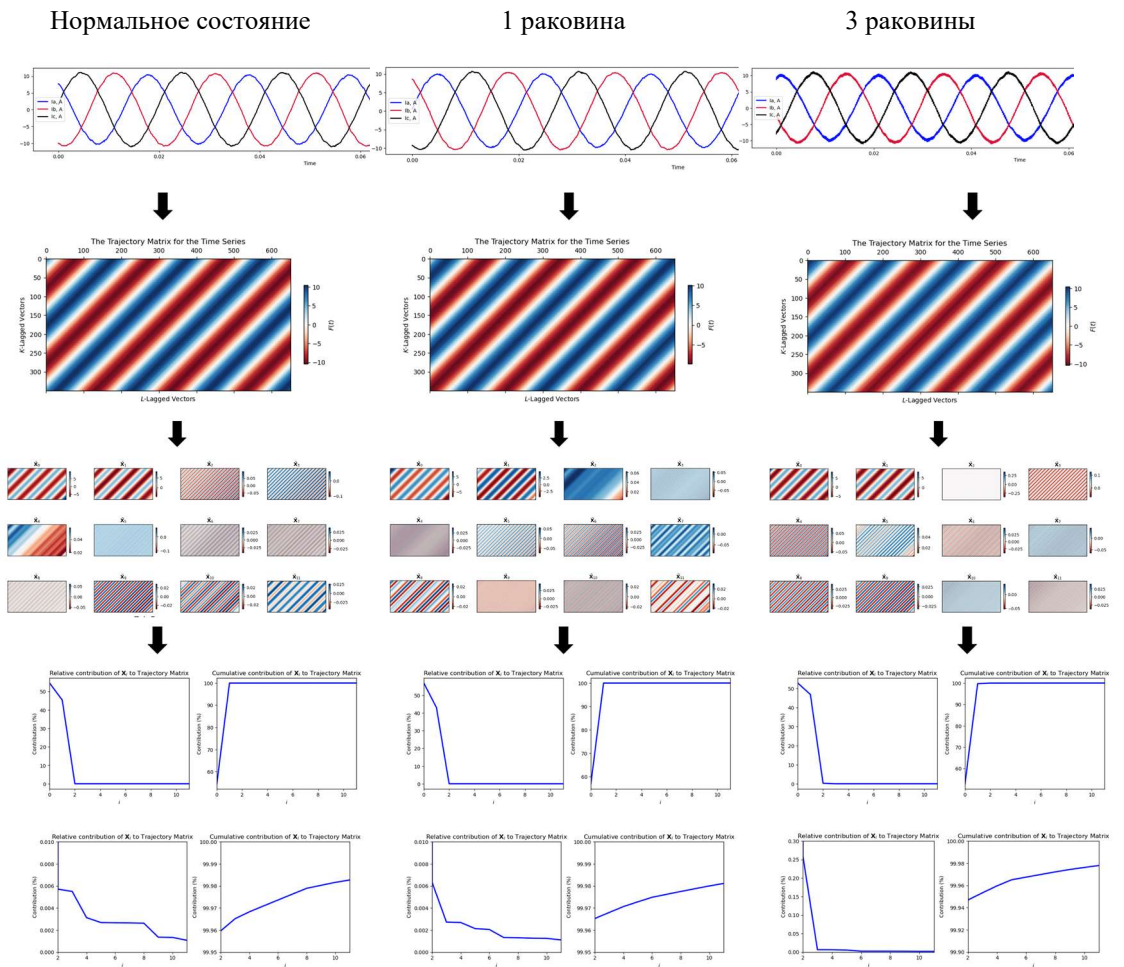


Рисунок 10 – Визуализация этапов работы алгоритма раннего обнаружения дефектов на основе сингулярного анализа спектра тока АДКР



Рисунок 11 – Этапы перехода к управлению жизненным циклом эксплуатации на основе цифровых технологий

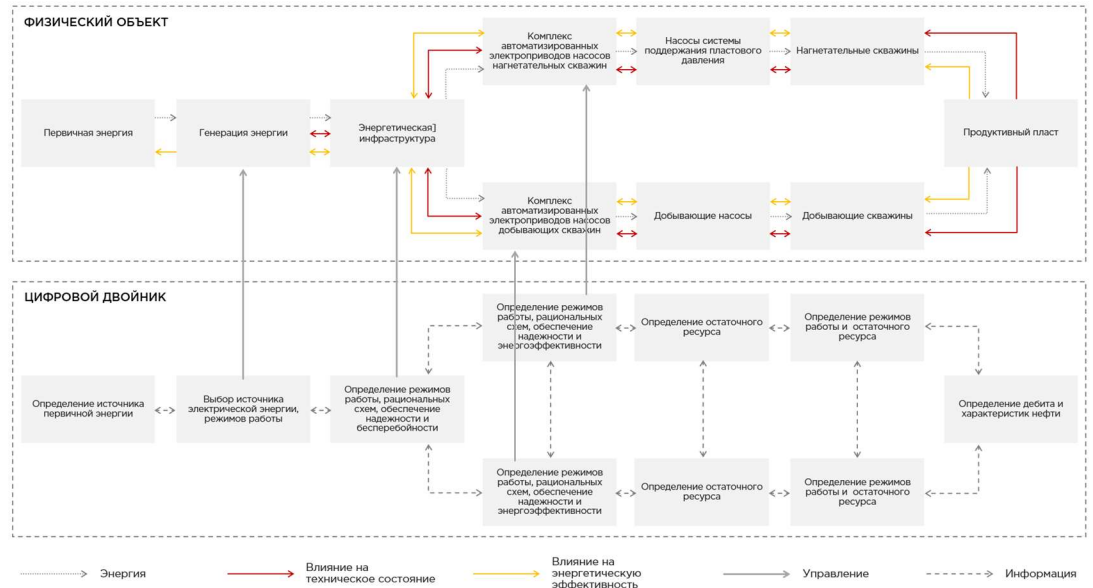


Рисунок 12 – Архитектура ЦД процесса управления безопасной и эффективной эксплуатацией объекта добычи нефти



Рисунок 14 – Методика построения математической модели сценарного прогнозирования развития ЭТК ГиНГП

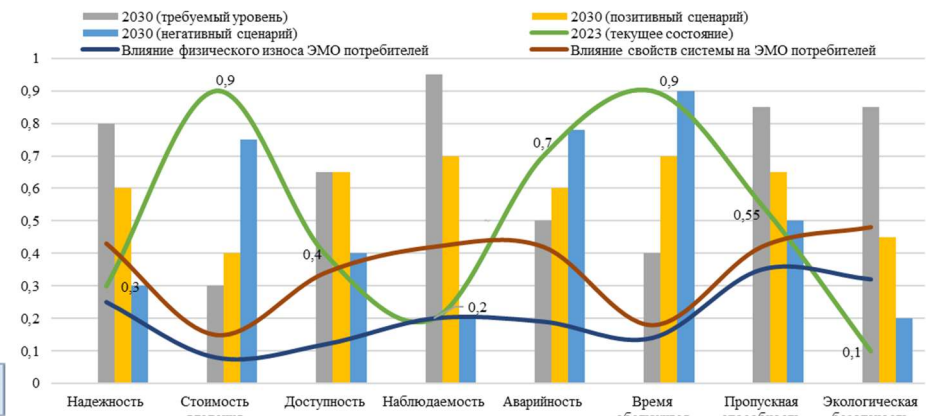


Рисунок 15 – Результаты сценарного моделирования изменения свойств энергетической инфраструктуры с учетом технологических изменений и их влияние на риски эксплуатации ЭМО потребителей



		Компоненты электротехнического комплекса					
		Деталь	Узел оборудования	Единица оборудования	Группа оборудования	Технологическая цепочка	ЭТК
<b>Зона воздействия</b>  <b>Критерии принятия решений по техническому воздействию</b>  <b>I</b> Техническое состояние <b>II</b> СЖЦЭ (Стоимость жизненного цикла эксплуатации) <b>III</b> Риски/Рост потребления энергии <b>IV</b> Свойства систем	<b>Технические воздействия</b>  <b>N1</b> Профилактическое техническое обслуживание <b>N2</b> Корректирующее техническое обслуживание <b>N3</b> Диагностическое обслуживание <b>N4</b> Текущий ремонт <b>N5</b> Капитальный ремонт <b>N6</b> Модернизация/повышение эффективности <b>N7</b> Реконструкция <b>N8</b> Техническое перевооружение	<b>I</b>	<b>I</b>				
			<b>I</b>	<b>II</b>			
			<b>II</b>	<b>II</b>			
				<b>II</b>	<b>II</b>		
				<b>II</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	
				<b>III</b>	<b>III</b>	<b>III</b>	
					<b>III</b>	<b>IV</b>	<b>IV</b>
						<b>IV</b>	<b>IV</b>
		3 года	8 лет	10 лет	20 лет		

Рисунок 16 – Карта определения технических воздействий на ЭМО в ЭТК ГИНПП на основе критериев

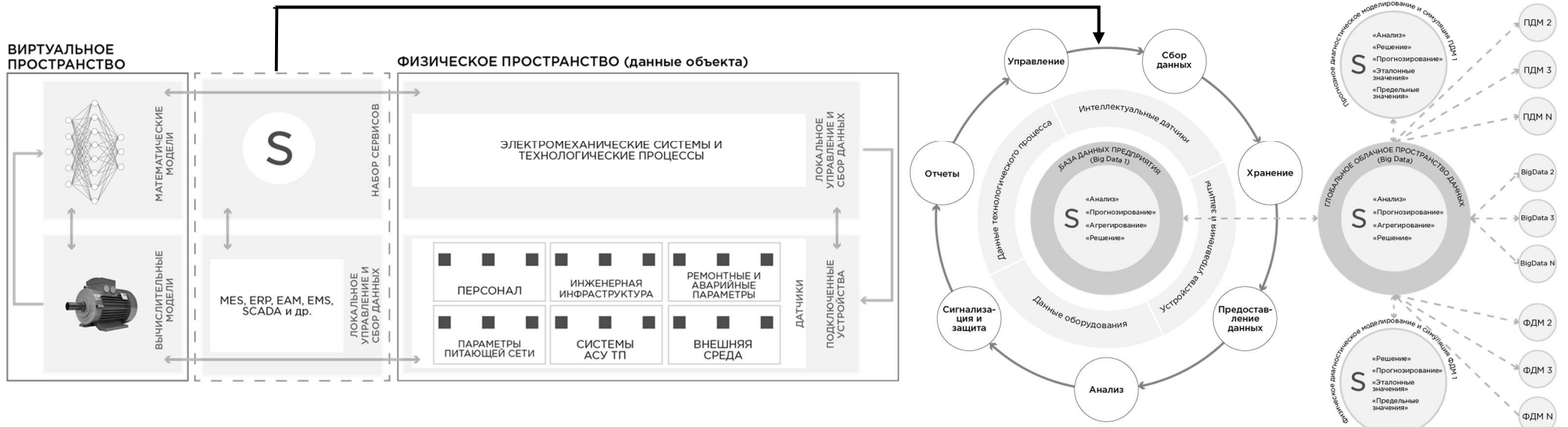


Рисунок 17 – Концептуальная модель взаимосвязанных программных сервисов в составе ЦД системы управления жизненным циклом эксплуатации ЭМО с учётом технического состояния