На правах рукописи

Петроченков Антон Борисович

Развитие теории и совершенствование методов обеспечения эффективного функционирования электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Официальные оппоненты:
Козярук Анатолий Евтихиевич, доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет» (г. Санкт-Петербург),
заведующий кафедрой электроэнергетики и электромеханики

Портнягин Николай Николаевич, доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина» (г. Москва),
профессор кафедры теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности

Федоров Олег Васильевич, доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева» (г. Нижний Новгород),
профессор кафедры «Управление инновационной деятельностью»

Ведущая организация:
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» (г. Екатеринбург)

Защита диссертации состоится «__» _____ 2016 г. в ____час. на заседании Диссертационного совета Д212.132.15 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» и на сайте http://misis.ru.

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2016 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета
кандидат технических наук,
профессор Шешко Евгения Евгеньевна

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Минерально-сырьевая отрасль является одной из ключевых для экономики Российской Федерации. Дальнейшее развитие и повышение эффективности предприятий минерально-сырьевой отрасли (ПМСО) предусматривают, с одной стороны, интенсификацию добычи полезных ископаемых за счет внедрения технологий увеличения производительности оборудования, развития автоматизации и интеллектуализации промыслов, с другой стороны, существенное уменьшение доли затрат отраслевых предприятий на электроэнергию и обслуживание энергетического комплекса, в том числе и за счет внедрения систем малой и автономной генерации.

Повышение эффективности функционирования электротехнических комплексов (ЭТК) предприятий минерально-сырьевой отрасли требует дальнейшего углубления знаний об их качественных свойствах.

Разнообразие технологических факторов, обусловливающих функционирование ПМСО, приводит к разнообразию структур электротехнических комплексов, электроэнергетических систем, а также к изменению режимов их работы. Это неразрывно связано с проблемой оценок текущего и прогнозного состояний режимов функционирования ЭТК ПМСО в условиях значительной территориальной распределенности, различных горно-геологических и климатометеорологических факторов, а также с учетом требований к минимизации затрат на техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) электротехнического оборудования (ЭО), в том числе и выбранными по конкурсу обслуживающими организациями.

Применяемые в настоящее время методы оценки состояния режимов функционирования ЭТК основываются на теоретических подходах и моделях, которые не в должной мере отвечают современным требованиям к анализу режимов, текущего и прогнозного состояния элементов ЭТК, в том числе в части полноты, комплексности, охвата составляющих процесса функционирования ЭТК. Кроме прочего рассматриваемые подходы и модели в свете развития информационных технологий позволяют автоматизировать лишь отдельные тематические этапы (разделы) проектирования, расчета и анализа функционирования электротехнического оборудования предприятий. В этом случае информационная база для принятия решений по обеспечению эффективного функционирования ЭТК сужается, что приводит к снижению уровня научного обоснования оценок функционального состояния элементов ЭТК и анализа влияния отказов ЭО на работу электроэнергетической системы (ЭЭС) ПМСО.

Вместе с этим при анализе функционирования ЭТК не в полной мере принимается во внимание взаимосвязь всех этапов жизненного цикла (ЖЦ) ЭТК, включая проектирование, изготовление, эксплуатацию, утилизацию. По-

этому недостаточно учитываются аспекты: моделирования взаимодействия элементов ЭТК в электроэнергетической системе, построения систем диспетчеризации и управления ЭТК, экономического планирования, оценки рисков отказов ЭО, управления жизненным циклом ЭТК.

Постоянное увеличение степени интеллектуализации электротехнического оборудования, усложнение «мобильных» структур и топологии систем электроснабжения (ЭС) ПМСО, внедрение современных систем мониторинга и технической диагностики (прежде всего, систем класса *SmartGrid*) требуют дальнейшего развития теории моделирования электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли в части повышения научного уровня методов исследования, оценки состояния, моделирования, прогнозирования и расчета режимов функционирования ЭТК, особенно в условиях неопределенности и неполноты информации.

Сложность процессов, влияние многих факторов, учет имеющихся многокомпонентных ресурсов и необходимость принятия обоснованных и оперативных решений в любой период жизненного цикла ЭТК ПМСО предполагают использование при проектировании и эксплуатации электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли методов системного анализа, моделирования, интегрированной логистической поддержки, эволюционного реинжиниринга, вычислительного эксперимента. Совокупность этих методов, поддерживаемых инструментальными вычислительными системами и применяемых с целью повышения качества управленческих решений при минимальных технико-экономических затратах, целесообразно использовать как основу принципиально новой методологии с применением энергоинформационных моделей электротехнических комплексов.

В связи с изложенным выполненная в рамках диссертационного исследования разработка теоретических положений, позволивших осуществить: развитие методов оценки состояний и моделирования режимов функционирования электротехнических комплексов ПМСО в условиях неопределенности и неполноты информации, совершенствование методов оперативного анализа режимов функционирования ЭТК, улучшение методов исследования, принципов и способов повышения эффективности функционирования ЭТК предприятий минерально-сырьевой отрасли, представляется актуальной, а результаты работы могут быть квалифицированы как определенный вклад в развитие теории моделирования электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли.

Связь темы диссертации с государственными научными программами. Работа выполнялась в соответствии с тематическими планами заказ-наряда 2105 НТП «Научные исследования высшей школы по приоритетным направле-

ниям науки и техники» Минобразования РФ (2001–2002 гг.), подпрограммы «Инновационные научно-технические проекты по приоритетным направлениям науки и техники» НТП «Инновационная деятельность высшей школы» Минобразования РФ (2002 г.), грантов Президента РФ для государственной поддержки молодых российских учёных–кандидатов наук 02.120.11.4435-МК (2008–2009 гг.), МК-2773.2011.8 (2011–2012 гг.), договора № 13.G25.31.0009 по Постановлению № 218 Правительства РФ от 09.04.2010 г. о создании высокотехнологичных производств (2010–2012 гг.).

Тематика диссертационных исследований соответствует тематике работ выполняемого в настоящее время гранта РФФИ № 14-07-96000 (2014–2016 гг.).

Цель работы – теоретическое обобщение, установление закономерностей, разработка методов, мероприятий, технических и программных средств, позволяющих повысить эффективность функционирования электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли.

Идея работы заключается в представлении электротехнического комплекса предприятия минерально-сырьевой отрасли в виде энергоинформационной модели, для улучшения достоверности, оперативности оценок текущего и прогнозного состояний которой требуется развитие теории и методов, позволяющих принимать решения по повышению эффективности функционирования электротехнического оборудования в условиях неопределенности и неполноты информации.

Для достижения указанной цели в диссертации поставлены и решены следующие ***задачи***:

1) анализ функционирования и управления режимами работы электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли с учетом требований как к «мобильной структуре» и топологии электроэнергетических систем, так и к системам мониторинга и диагностики технического состояния их элементов;

2) разработка метода и алгоритмов оперативного анализа режимов функционирования электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли;

3) разработка энергоинформационной модели электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли, синтезированной с применением матрично-топологического подхода;

4) разработка иерархической структуры и базы моделей элементов электротехнических комплексов, сопоставимых с методами и алгоритмами оперативного анализа режимов функционирования электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли;

5) разработка методов, принципов и способов повышения эффективности функционирования электротехнических комплексов с использованием энергоинформационного моделирования;

6) разработка структуры и алгоритмов гибкой информационно-программной среды для управления состоянием элементов электротехнических комплексов на различных этапах жизненного цикла, совместимой с информационно-аналитическими системами производства;

7) разработка научно-технических решений и мероприятий, обеспечивающих повышение эффективности функционирования электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли, и рекомендаций по их применению.

Методы исследования. Для решения поставленных задач используются методы теории автоматического управления, моделирования, вычислительной математики, матриц, графов, алгоритмизации, вероятности, надежности, планирования эксперимента, оптимизации, ошибок, теории электрических цепей, электропривода. Проведены экспериментальные исследования с использованием технических средств контроля и управления технологическим оборудованием, а также с применением современных тепловизионных приборов. Эксплуатационные ситуации с изменением технического состояния (ТС) моделировались с применением метода статистических испытаний, а действия обслуживающего персонала имитировались в соответствии с алгоритмом, идентичным содержанию требований действующих на электроустановках нормативных документов. При практической реализации алгоритмов автоматизированного моделирования использовались методы структурного и объектно-ориентированного программирования, *IDEF*-диаграммы, *CASE*-диаграммы, *UML*-диаграммы, диаграммы сценариев (*UCD*), языки программирования *Inprise Borland Delphi* 7.0, *C++*, *Java*, системы управления базами данных *Oracle*, *Interbase*, программные среды *LabView, Matlab, MS Excel, Maple, MathCad.*

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1) методология оценки состояний и моделирования режимов функционирования электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли на основе принципов и способов организации автоматизированного формирования математического описания электротехнических систем сложной структуры, в том числе в условиях неопределенности и неполноты информации;

2) метод оперативного анализа режимов функционирования электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли, включающий: расчеты электроэнергетических параметров текущего и прогнозного состояний режимов ЭТК; установление методов управления и определение их траекторий

для элементов ЭТК на различных этапах жизненного цикла; выбор и определение основных диагностируемых параметров элементов ЭТК; определение функций эффективности для элементов ЭТК в заданные моменты времени;

3) энергоинформационная модель электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли, синтезированная с применением матрично-топологического подхода;

4) иерархическая структура и модели элементов электротехнических комплексов, используемые при автоматизированном формировании математического описания электротехнических систем сложной структуры, типизированные по классификационным признакам взаимодействия в энергоинформационной модели;

5) новые методы исследования, принципы и способы повышения эффективности функционирования электротехнических комплексов с применением энергоинформационного моделирования, которые отражают временной, факторный и комбинированный аспекты, и использование которых обеспечивает эффективные оценки и прогноз состояния элементов ЭТК с адаптацией к изменению горно-геологических, климатометеорологических, а также территориальных и иерархических условий и факторов;

6) обоснование и разработка научно-технических решений, обеспечивающих повышение эффективности функционирования электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли.

Научная новизна диссертационной работы заключается: в разработке методологии исследования и оценки состояний и моделирования режимов функционирования электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли в условиях неопределенности и неполноты информации; в совершенствовании метода расчета режимов электроэнергетических систем произвольной структуры на основе уравнений узловых напряжений, отличающегося отсутствием приведения элементов ЭЭС к каждой ступени трансформации; в обосновании математического описания электротехнических комплексов в виде энергоинформационной модели, синтезированной с применением матрично-топологического подхода; в установлении иерархической структуры и базы моделей элементов электротехнических комплексов, типизированных по классификационным признакам взаимодействия в энергоинформационной модели; в установлении базы диагностических признаков элементов электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли, отражающих временной, факторный и комбинированный аспекты, и использование которых обеспечивает эффективные оценки и прогноз состояния элементов ЭТК с адаптацией к изменению горно-геологических, климатометеорологических, а также

территориальных и иерархических условий и факторов; в обосновании функций эффективности и в разработке методики оценки прогнозного технического состояния электротехнического оборудования; в моделировании процессов проектирования, производства и эксплуатации, соответствующих различным этапам жизненного цикла элементов электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли; в обосновании метода генетического алгоритмирования и принципов организации экспертной оценки факторов риска отказов электротехнического оборудования; в разработке структуры и алгоритмов гибкой информационно-программной среды для управления состоянием элементов электротехнических комплексов на различных этапах жизненного цикла, совместимой с информационно-аналитическими системами производства; в обосновании и разработке научно-технических решений, обеспечивающих повышение эффективности функционирования электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются:

– корректным использованием апробированного математического аппарата теории автоматического управления, моделирования, вычислительной математики, матриц, графов, алгоритмизации, вероятности, надежности, планирования эксперимента, оптимизации, ошибок, теории электрических цепей;

– использованием обоснованных математических моделей структурных элементов электроэнергетической системы, а также корректностью последующих аналитических преобразований при общепринятых допущениях для рассматриваемого класса оборудования;

– допустимым уровнем погрешности аппроксимации экспериментальных данных приближающими функциями, не превышающими: при моделировании режимов электроэнергетических систем – 5 %, для оценок эксплуатационного состояния элементов ЭТК – 10 %, для прогнозных оценок технического состояния элементов ЭТК – 5 %;

– апробацией основных положений диссертации во внедренных в производство нормативно-технических документах по оценке технического состояния электротехнического оборудования, по проведению организационно-технических мероприятий по повышению эффективности функционирования электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли, а также при использовании в учебном процессе.

Значение полученных результатов работы:

для теории – в разработке методологии оценки состояний и моделирования режимов функционирования электротехнических комплексов предприятий

минерально-сырьевой отрасли на основе принципов и способов организации автоматизированного формирования математического описания электротехнических систем сложной структуры; в разработке метода и алгоритмов оперативного анализа режимов функционирования электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли; в разработке энергоинформационной модели электротехнических комплексов, синтезированной с применением матрично-топологического подхода; в установлении иерархической структуры и базы моделей элементов электротехнических комплексов, типизированных по классификационным признакам взаимодействия в энергоинформационной модели; в разработке новых методов исследования, принципов и способов повышения эффективности функционирования электротехнических комплексов с применением энергоинформационного моделирования, которые отражают временной, факторный и комбинированный аспекты, и использование которых обеспечивает эффективные оценки и прогноз состояния элементов ЭТК с адаптацией к изменению горно-геологических, климатометеорологических, а также территориальных и иерархических условий и факторов; в разработке научно-технических решений, обеспечивающих повышение эффективности функционирования электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли.

Вышеизложенные результаты позволили развить теорию моделирования электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли в части: совершенствования методов оценки состояний и моделирования режимов функционирования электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли; дополнения известных методов расчета режимов электроэнергетических систем; развития методов исследования, принципов и способов повышения эффективности функционирования электротехнических комплексов;

для практики – в разработке методик расчета режимов электроэнергетических систем произвольной структуры; в разработке алгоритмов процессов проектирования, производства и эксплуатации, соответствующих различным этапам жизненного цикла элементов электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли; в разработке и внедрении систем информационной поддержки управления жизненным циклом элементов электротехнических комплексов, совместимых с информационно-аналитическими системами производства; в разработке и внедрении нормативно-технических документов по оценке технического состояния электротехнического оборудования, по проведению организационно-технических мероприятий по повышению эффективности функционирования электротехнических комплексов предприятий минерально-

сырьевой отрасли; в разработке и внедрении учебных пособий, интерактивных электронных образовательных ресурсов и технических руководств на отраслевых предприятиях и в учебный процесс Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Реализация результатов работы. Методология оценки состояний ЭТК использована и внедрена в методике оценки ТС ЭО на предприятиях ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» и Пермского регионального управления ООО «ЛУКОЙЛ-ЭНЕРГОСЕТИ». База моделей элементов ЭТК, используемых при автоматизированном формировании математического описания электротехнических систем сложной структуры, метод и алгоритмы оперативного анализа режимов функционирования ЭТК приняты к использованию на предприятиях ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ», ООО «ЛУКОЙЛ-ЭНЕРГОСЕТИ», ПАО «ПРОТОН-Пермские моторы», группы компаний «СПУТНИК». Технологические карты по ТОиР ЭО, включающие модели технологических операций, используются для сервисного обслуживания ЭО региональных предприятий ОАО «ЛУКОЙЛ», ОАО «УРАЛКАЛИЙ», ЗАО «СИБУР-ХИМПРОМ», ООО «Пермская электроремонтная компания». «Система информационной поддержки управления жизненным циклом электротехнического оборудования» внедрена на предприятии ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ». Результаты диссертационного исследования использованы при разработке «Схемы и программы развития электроэнергетики Пермского края на 2014–2018 годы».

Основные научные результаты диссертации используются в учебном процессе Пермского национального исследовательского политехнического университета при подготовке студентов по направлениям 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств».

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы в период с 2003 по 2015 г. докладывались и обсуждались на 42 международных, 19 всероссийских и 21 межрегиональных и краевых конгрессах, симпозиумах и конференциях, в том числе: «Энергопотребление и энергосбережение: проблемы, решения» (г. Пермь, 2003), «Энергетика, материальные и природные ресурсы. Эффективное использование. Собственные источники энергии» (г. Пермь, 2005–2007), «*2nd International Congress of Mechanical and Electrical Engineering and Marine Industry* «*MEEMI* ‘2005» (г. Варна, Болгария, 2005), «Инновационная энергетика» (г. Пермь, 2007–2015), «Управление инновациями: теория, инструменты, кадры» (г. Санкт-Петербург, 2007, 2009, 2011), «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде *LabVIEW* и технологии *National Instruments*» (г. Москва,

2007, 2009, 2013, 2014), «Управление производством в системе *TRACE MODE*» (г. Москва, 2008, 2009), «Перспективы развития информационных технологий» (г. Новосибирск, 2008), «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук» (г. Москва, 2008), «Управление большими системами» (г. Ижевск, 2009, г. Пермь, 2010), «*ICEEE*-2010: 13*th International conference on electromechanics, electrotechnology, electromaterials and components*» (г. Алушта, 2010), «Высокие интеллектуальные технологии и инновации в национальных исследовательских университетах» (г. Санкт-Петербург, 2011, 2012), «*Solutions of applied problems in control, data processing and data analysis*» (г. Кётен, Германия, 2010–2014), «Эффективные методы автоматизации подготовки и планирования производства» (г. Москва, 2011), VII и VIII Международные (XVIII и XIX Всероссийские) научно-технические конференции по автоматизированному электроприводу (г. Иваново, 2012, г. Саранск, 2014), «*International Conferences on Applied Innovations in IT*» (г. Кётен, Германия, 2013–2015), «Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий» (г. Уфа, 2013), *«NI Week*» (г. Остин, США, 2013, 2014), «Неделя горняка» (г. Москва, 2014, 2015), «*Xperience Efficiency*» (г. Москва, 2014), XVIII Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям *SCM*'2015 (г. Санкт-Петербург, 2015), «Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике» (г. Пермь, 2015); на секциях научно-технических советов, научно-технических семинарах и конференциях предприятий пермской группы нефтяной компании «ЛУКОЙЛ», ПАО «ГАЗПРОМ», филиала ОАО «МРСК Урала» – «Пермэнерго», ПАО «ПРОТОН-Пермские моторы».

Разработки по тематике исследований отмечены наградами международных выставок и конгрессов: «Высокие технологии. Инновации. Инвестиции». Неделя высоких технологий в Санкт-Петербурге» (2004), «Московский международный салон инноваций и инвестиций» (2004–2007, 2010), «*CeBIT*» (г. Ганновер, Германия, 2004), «*Brussels Eureka/Innova Energy*» (г. Брюссель, Бельгия, 2004, 2009, 2011, 2012, 2014), «Высокие технологии XXI века» (г. Москва, 2006, 2008), «Московский международный салон изобретений и инновационных технологий «Архимед» (2011–2015).

Публикации. Список научных трудов автора содержит 50 публикаций, при этом основное содержание диссертации опубликовано в 40 печатных работах, в том числе 18 публикаций в изданиях, рекомендованных ВАК России для докторских диссертаций, 10 публикаций в изданиях, входящих в систему цитирования *SCOPUS*.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 327 источников (в том числе

70 зарубежных) и приложений. Общий объем диссертации – 367 с., 54 рисунка, 70 таблиц, 52 с. приложения.

Автор выражает глубокую признательность своему учителю, руководителю докторантуры, профессору, доктору технических наук В.М. Винокуру за методическую помощь и постановку направлений исследований при подготовке диссертационной работы.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, изложены методы исследования, основные научные результаты, отражены практическая ценность и реализация полученных результатов. Описана структура диссертации, приведены сведения по апробации результатов.

Первая глава посвящена исследованию состояния и задач повышения эффективности функционирования электротехнических комплексов ПМСО.

Исследования электротехнических комплексов как совокупности взаимосвязанных и взаимодействующих подсистем различной физической природы нашли отражение в работах известных отечественных и зарубежных ученых: Б.Н. Абрамовича, Д.А. Аветисяна, В.Я. Беспалова, В.А. Веникова, С.И. Гамазина, К.С. Демирчяна, М.С. Ершова, В.И. Идельчика, Н.Ф. Ильинского, А.Л. Карякина, В.З. Ковалева, Ю.З. Ковалева, А.Е. Козярука, М.В. Костенко, Б.И. Кудрина, А.В. Ляхомского, Ю.К. Розанова, Ф.Н. Сарапулова, О.В. Федорова, Р.Т. Шрейнера, Ю.А. Шурыгина, *F. Kloeppel, A. Kwasinski, M. Paolone* и др.

Методологическая база системных исследований в электроэнергетике, соответствующих методов прогнозирования, проектирования и развития электроэнергетических систем в нашей стране сформирована на основе трудов Д.А. Арзамасцева, В.А. Баринова, Л.С. Беляева, И.М. Волькенау, А.З. Гамма, В.В. Ершевича, А.Н. Зейлингера, Н.И. Зеленохата, В.Г. Китушина, М.Ш. Мисриханова, М.Н. Розанова, Ю.Н. Руденко, С.А. Совалова, В.Д. Шлимовича и др.

В работах В.З. Ковалева в электротехнических комплексах выделяются электрические, магнитные, механические, тепловые (и др.) подсистемы различной физической природы с учетом их взаимного влияния на процессы преобразования энергии в статических и динамических режимах ЭТК в целом.

Для электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли характерны, прежде всего, электрические и механические процессы.
В общем виде структура современного ЭТК ПМСО приведена на рисунке 1.

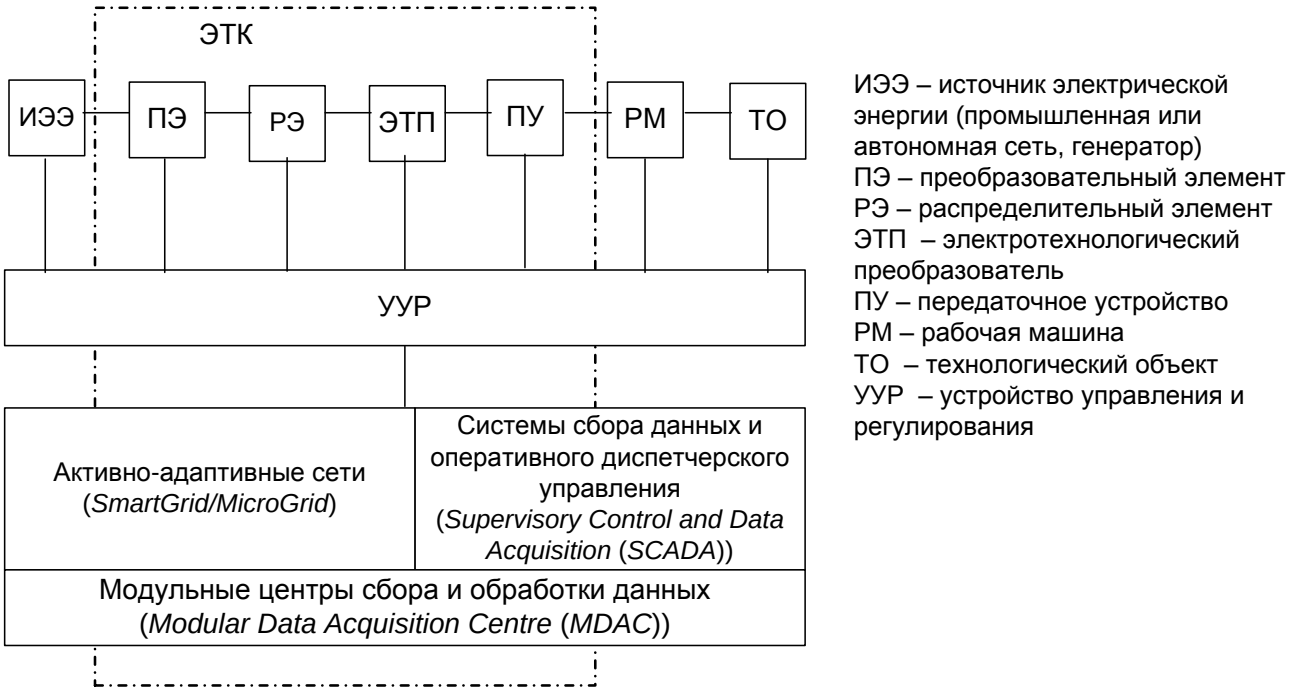

Рисунок 1 – Структура электротехнического комплекса ПМСО

Проведенные исследования и анализ структуры, параметров и особенностей электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли выявили следующие специфические факторы:

– территориальная распределенность объектов ЭЭС (например, в ЭЭС нефтедобывающего предприятия может быть до 300 территориально-распределенных трансформаторных подстанций без дежурного персонала); большая часть электроустановок относится к категории ответственных;

– существенное влияние горно-геологических и климатометеорологических условий внешней среды на функционирование технологического и электротехнического оборудования;

– гетерогенность элементов электроэнергетической системы (выражающаяся в множественности описания ЭО, привязке к технологическим установкам); наличие в составе ЭО большого количества контактных соединений и коммутационной аппаратуры, от состояния которых в значительной степени зависит надежность всей ЭЭС ПМСО;

– мобильный характер работы и аутсорсинг задач обслуживания ЭО (с использованием различных методик, различной инструментальной базы, штата сотрудников с разным опытом и квалификацией на разных территориальных подразделениях одного предприятия);

– значительный срок эксплуатации электрооборудования с необходимостью решения задач по принципу «здесь и сейчас»;

– интенсивное развитие систем малой и автономной генерации.

Исследования в области подходов к управлению различными этапами эксплуатации электротехнического и технологического оборудования отражены в трудах В.С. Генина, А.С. Карандаева, А.М. Никитина, А.Г. Схиртладзе, А.И. Ящуры, *R.L. Ackoff, M. Bagajewicz, D. Banjevic, D.W. Bunn, A.K.S. Jardine, R. Reinertsen, A.K. Verma* и др.

В современных условиях анализ таких подходов (в том числе регламентированных российскими (ГОСТ 2.601-2013, ГОСТ 27.310-95, ГОСТ Р 51901.5-2005, ГОСТ Р ИСО 50001-2012, ГОСТ Р ИСО 9001-2015) и международными (IEC 61970-301, IEC/TR 61968-11, IEEE C37.238, ISO 15926, ISO/IEC 15288) стандартами, отраслевыми руководящими документами, ведущими зарубежными методиками (*NAESB REQ*18/*WEQ*19, *NEMA SGAMI* 1, *IETF RFC*62721, *SAE J*1772*TM, SAE J*28361, *NISTIR* 7761*L*, *SERA*)) показывает, что для обеспечения эффективного функционирования ЭТК ПМСО необходимо учитывать все этапы жизненного цикла электротехнического комплекса.

Разработанная структурно-функциональная схема управления ЖЦ ЭТК ПМСО приведена на рисунке 2.

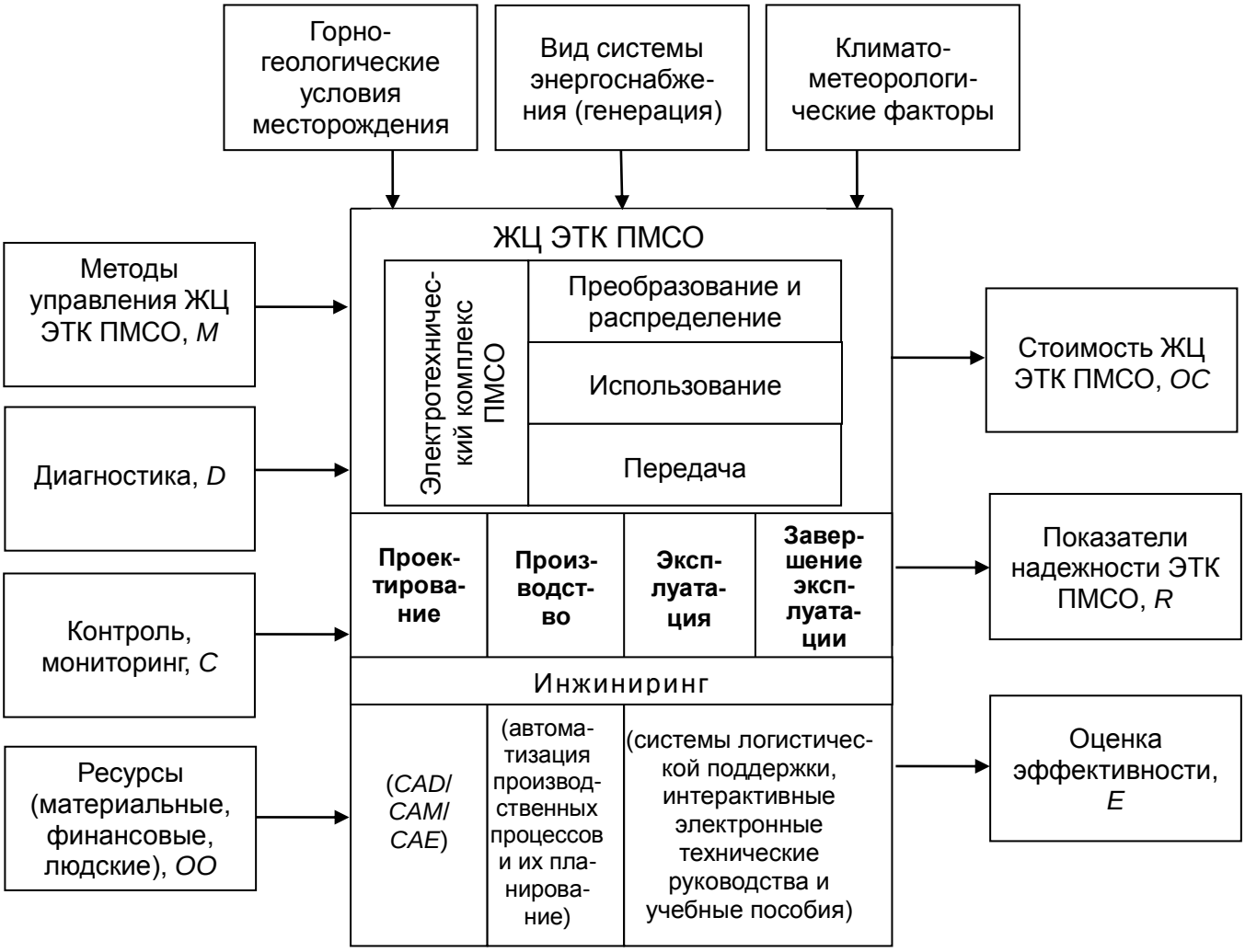

Рисунок 2 – Схема управления ЖЦ ЭТК ПМСО

Предлагаемые в диссертационном исследовании методы управления ЖЦ ЭТК ПМСО приведены на рисунке 3.

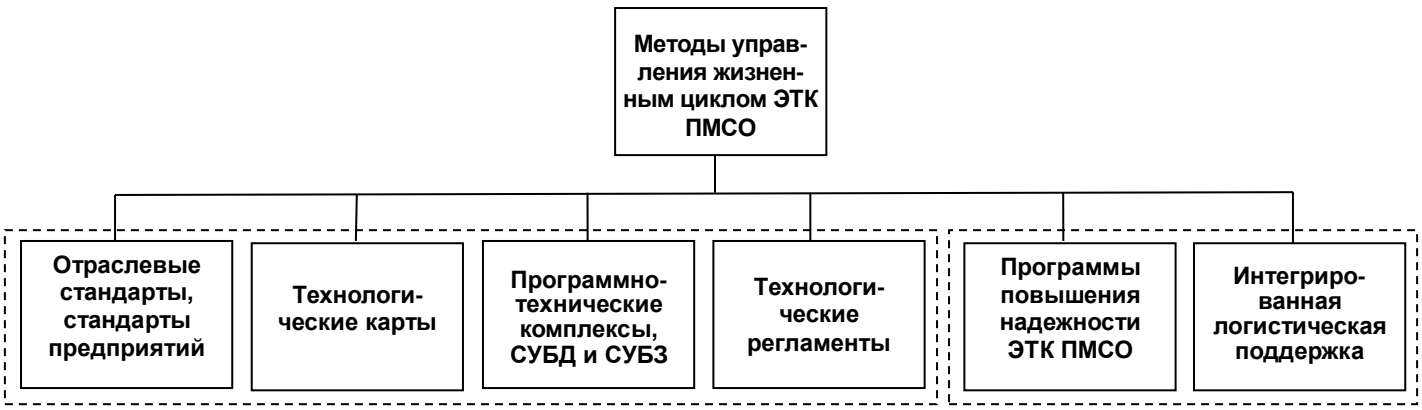

Рисунок 3 – Методы управления ЖЦ ЭТК ПМСО
(СУБД – система управления базой данных, СУБЗ – система управления базой знаний)

Необходимо рассматривать ЭТК ПМСО как эмерджентную систему, которая имеет многоуровневую структуру достаточно большой размерности со сложными энергетическими, технологическими, информационными (в современных условиях – и геоинформационными) связями. За рубежом ЭТК давно уже рассматривают как «интеллектуальные экосистемы» (например, в концептуальном документе *SERA* – «Эталонная архитектура интеллектуальных энергосетей» – компании «*Microsoft*»).

В работах Н.И. Зеленохата рассматривается метод информационной декомпозиции, основу которого составляют электроэнергетические подсистемы, формируемые на определенных иерархических уровнях.

Профессор Уральского федерального университета С.Е. Кокин ввел термин «**энергоинформационная модель**»: в его работах система электроснабжения «делится на кластеры, каждый из которых обладает единым уровнем представленной информации и определенными операционными воздействиями».

Очевидно, что предлагаемая терминология может быть применима не только к системам электроснабжения, но и к электротехническим комплексам и системам.

В отличие от методов, рассмотренных в указанных работах, предлагается при разработке энергоинформационной модели ЭТК использовать матрично-топологический подход. Положительная сторона матрично-топологического направления теории цепей заключается в большой степени упорядоченности составления систем уравнений. Могут быть составлены алгоритмы, позволяющие не только составлять системы уравнений с помощью ЭВМ, но и осуществлять с их помощью расчеты на оптимальные в том или ином смысле режимы

функционирования ЭТК.

Поэтому, принимая во внимание сложность процессов функционирования ЭТК ПМСО, подверженных влиянию многих факторов, учитывая многокомпонентные ресурсы и необходимость повышения уровня принятия решений в условиях неопределенности и неполноты информации в любой период ЖЦ ЭТК ПМСО, требуется развитие методологии моделирования электротехнических комплексов, поддерживаемых инструментальными вычислительными системами.

На основании проведенного анализа современного состояния теории и методов обеспечения эффективного функционирования ЭТК сформулированы задачи диссертационного исследования.

Во второй главе представлена методология моделирования режимов функционирования ЭТК ПМСО на основе принципов и способов организации автоматизированного формирования математического описания электротехнических систем сложной структуры.

Процесс создания математической модели ЭТК рассматривается как последовательность двух этапов: создание моделей отдельных элементов и создание модели их взаимодействия. В известных работах В.А. Веникова и в работах О.А. Суханова, продолжающих идеи В.А. Веникова, подходы к исследованию систем такого типа подразделяются на методы, направленные на упрощение или понижение размерности рассматриваемой модели, и методы декомпозиции, позволяющие получить решение большой задачи высокого порядка, в которых рассматриваются отдельные малые задачи и комбинируются полученные решения.

Под элементами ЭТК понимаются подсистемы, не подлежащие дальнейшему расчленению, внутренние процессы в которых не рассматриваются.

Взаимодействие электрически связанных элементов наиболее естественно организовать посредством таких электрических параметров режима, как токи и напряжения. Расчеты режимов ЭЭС базируются на решении уравнений, сформулированных на основе метода уравнений узловых напряжений (УУН). На основе анализа выбрана модель в виде комплексных УУН в форме баланса токов при задании нагрузки постоянной проводимостью, с использованием топологических матриц.

Система уравнений структурного элемента ЭТК относительно внешних переменных представляется в общем виде следующим векторным уравнением:

$$p\mathbf{I}_i = -\mathbf{A}_i\mathbf{U}_i - \mathbf{B}_i\mathbf{I}_i - \mathbf{H}_i, \qquad (1)$$

где $\mathbf{I}_i$ – вектор токов i-го элемента; $p\mathbf{I}_i$ – вектор производных токов i-го элемента; $\mathbf{U}_i$ – вектор напряжений, приложенных между внешними зажимами i-го элемен-

та; $\mathbf{A}_i$, $\mathbf{B}_i$ – матрицы, размерность которых зависит от системы координат, в которых моделируется структурный элемент, а также от того, полные это уравнения или упрощенные; $\mathbf{H}_i$ – вектор, определяющий воздействие на элемент, например, со стороны средств регулирования электрических параметров.

В диссертационной работе приняты следующие основные модели элементов ЭТК ПМСО в системе координат (d, q) (при записи систем математических уравнений использованы общепринятые обозначения):

Сеть внешнего ЭС: $\mathbf{A}_{\text{с}} = \begin{pmatrix} 1/x_{\text{с}} & 0 \\ 0 & 1/x_{\text{с}} \end{pmatrix}$, $\mathbf{B}_{\text{с}} = \begin{pmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{pmatrix}$, $\mathbf{H}_{\text{с}} = \begin{pmatrix} -E_d/x_{\text{с}} \\ -E_q/x_{\text{с}} \end{pmatrix}$.

Синхронные генераторы:

$$\mathbf{A}_{\text{СГ}} = \left(\begin{pmatrix} x_d & 0 \\ 0 & x_q \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_{ad} & x_{ad} & 0 \\ 0 & 0 & x_{aq} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_f & x_{ad} & 0 \\ x_{ad} & x_D & 0 \\ 0 & 0 & x_Q \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} x_{ad} & 0 \\ x_{ad} & 0 \\ 0 & x_{aq} \end{pmatrix} \right)^{-1},$$

$$\mathbf{B}_{\text{СГ}} = \mathbf{A}_{\text{СГ}} \times \begin{pmatrix} r_a & \omega x_q & -r_f \dfrac{x_D x_{ad} - x_{ad}^2}{x_f x_D - x_{ad}^2} & -r_D \dfrac{x_f x_{ad} - x_{ad}^2}{x_f x_D - x_{ad}^2} & \omega x_{aq} \\ -\omega x_d & r_a & -\omega x_{ad} & -\omega x_{ad} & -r_Q \dfrac{x_{aq}}{x_Q} \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{H}_{\text{СГ}} = \mathbf{A}_{\text{СГ}} \times \begin{pmatrix} \dfrac{x_D x_{ad} - x_{ad}^2}{x_f x_D - x_{ad}^2} \\ 0 \end{pmatrix} U_f .$$

Трансформаторы: $\mathbf{A}_{\text{т}} = -\begin{pmatrix} 1/x_{\text{т}} & 0 \\ 0 & 1/x_{\text{т}} \end{pmatrix}$, $\mathbf{B}_{\text{т}} = \begin{pmatrix} r_{\text{т}}/x_{\text{т}} & -\omega \\ \omega & r_{\text{т}}/x_{\text{т}} \end{pmatrix}$, $\mathbf{H}_{\text{т}} = \mathbf{0}$.

Линии электропередачи (ЛЭП): $\mathbf{A}_{\text{л}} = -\begin{pmatrix} 1/x_{\text{л}} & 0 \\ 0 & 1/x_{\text{л}} \end{pmatrix}$, $\mathbf{B}_{\text{л}} = \begin{pmatrix} r_{\text{л}}/x_{\text{л}} & -\omega \\ \omega & r_{\text{л}}/x_{\text{л}} \end{pmatrix}$, $\mathbf{H}_{\text{л}} = \mathbf{0}$.

Асинхронные двигатели (АД): $\mathbf{A}_{\text{АД}} = \left(\begin{pmatrix} x_1 & 0 \\ 0 & x_1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_{\mu} & 0 \\ 0 & x_{\mu} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_2 & 0 \\ 0 & x_2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} x_{\mu} & 0 \\ 0 & x_{\mu} \end{pmatrix} \right)^{-1}$,

$$\mathbf{B}_{\text{АД}} = \mathbf{A}_{\text{АД}} \times \begin{pmatrix} r_a & \omega x_1 - \omega_2 \dfrac{x_{\mu}^2}{x_2} & -r_2 \dfrac{x_{\mu}}{x_2} & (\omega - \omega_2) x_{\mu} \\ \omega_2 \dfrac{x_{\mu}^2}{x_2} - \omega x_1 & r_a & (\omega_2 - \omega) x_{\mu} & -r_2 \dfrac{x_{\mu}}{x_2} \end{pmatrix}, \; \omega_2 = \omega - \omega_{\text{АД}},$$

$\mathbf{H}_{\text{АД}} = \mathbf{0}$.

Статическая нагрузка: $\mathbf{A}_{\text{н}} = -\begin{pmatrix} 1/x_{\text{н}} & 0 \\ 0 & 1/x_{\text{н}} \end{pmatrix}$, $\mathbf{B}_{\text{н}} = \begin{pmatrix} r_{\text{н}}/x_{\text{н}} & \omega \\ -\omega & r_{\text{н}}/x_{\text{н}} \end{pmatrix}$, $\mathbf{H}_{\text{н}} = \mathbf{0}$.

Сформировав из правых частей уравнения (1) вектор $\mathbf{W}$,

$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} -\mathbf{B}_1\mathbf{I}_1 - \mathbf{H}_1 \\ -\mathbf{B}_2\mathbf{I}_2 - \mathbf{H}_2 \\ \vdots \\ -\mathbf{B}_i\mathbf{I}_i - \mathbf{H}_i \end{pmatrix}$, уравнение связи для ЭЭС произвольной структуры можно представить в виде:

$$\mathbf{П А П}^{\mathrm{T}}\mathbf{U} = \mathbf{П W} - \mathbf{П}'\mathbf{I}, \qquad (2)$$

где **П** – клеточная матрица структуры (инцидентности), клетками матрицы являются нулевые матрицы или матрицы преобразований,

$$\mathbf{П} = \begin{cases} \begin{pmatrix} -\cos\delta_{ij} & \sin\delta_{ij} \\ -\sin\delta_{ij} & -\cos\delta_{ij} \end{pmatrix}, \text{если направление ветви идет к узлу,} \\ \begin{pmatrix} \cos\delta_{ij} & -\sin\delta_{ij} \\ \sin\delta_{ij} & \cos\delta_{ij} \end{pmatrix}, \text{если направление ветви исходит из узла,} \\ \mathbf{0} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \text{если ветвь не инцидентна узлу;} \end{cases}$$

δ_{ij} – угол между координатами, в которых моделируется структурный элемент; **П′** – матрица, элементами которой являются нулевые клетки или клетки производных элементов матриц преобразования; **А** – блочная квазидиагональная матрица проводимостей ветвей (элементов), образующих ЭЭС,

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_{22} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \ldots & \mathbf{A}_{nn} \end{pmatrix}. \qquad (3)$$

Инициирующей процедурой оценки состояния элементов ЭТК является расчет стационарных (квазистационарных) режимов ЭЭС предприятия:

$$\mathbf{П А П}^{\mathrm{T}}\mathbf{U} = \mathbf{П W}. \qquad (2')$$

Разработанный метод моделирования стационарных (квазистационарных) режимов ЭЭС ПМСО на основе УУН состоит из следующих вычислительных процедур:

1) формирование расчетной схемы ЭЭС. Формирование матрицы **П**;

2) формирование уравнений структурных элементов. Перевод паспортных значений параметров элементов ЭТК в параметры схемы замещения ЭЭС; расчет номинальных, переходных и сверхпереходных параметров схем замещения;

3) установление базисного уровня напряжения $U_б$, *В*. Расчет коэффициентов приведения каждого элемента ЭТК к базисному уровню:

$$k_{\text{пр}i} = U_б / U_{\text{н}i},$$

где $U_{\text{н}i}$ – номинальное напряжение *i*-го элемента, для двухобмоточных транс-

форматоров $U_{\text{н}}=U_{\text{нн}}$, для источников электроэнергии $U_{\text{н}}=E_{\text{н}}$;

4) формирование вектора-столбца $\overset{\circ}{\mathbf{H}}$:

$$\left[\overset{\circ}{H}_i\right]=\begin{cases}\overset{\circ}{\mathbf{E}}_i, & i\in EES,\\ \overset{\circ}{\mathbf{E}}_{q\,i}, & i\in SM,\\ \mathbf{0}, & i\in L,\ i\notin SM,\end{cases}$$

где EES – множество ИЭЭ; SM – подмножество СД; L – множество потребителей нагрузки; $\overset{\circ}{\mathbf{E}}_i$ – приведенная к базисной ступени матрица ЭДС i-го ИЭЭ, $\overset{\circ}{\mathbf{E}}_i=k_{\text{пр}\,i}\cdot\mathbf{E}_i$; $\overset{\circ}{\mathbf{E}}_{qi}$ – приведенная к базисной ступени матрица ЭДС i-го СД по поперечной оси, $\overset{\circ}{\mathbf{E}}_{q\,i}=U_{\text{б}}\cdot\mathbf{E}_{q\,i}=U_{\text{б}}\cdot(0\quad e_{qi})^{\text{T}}$; e_{qi} – номинальная синхронная ЭДС i-го СД, *о. е* .

(в режиме короткого замыкания (КЗ) $\left[\overset{\circ}{H}_i\right]=\begin{cases}\overset{\circ}{\mathbf{E}}_i, & i\in EES,\\ \overset{\circ}{\mathbf{E}}''_i, & i\in(SM\cup AM),\\ \mathbf{0}, & i\in L,\ i\notin(SM\cup AM),\end{cases}$

где AM – подмножество АД; $\overset{\circ}{\mathbf{E}}''_i$ – приведенная к базисной ступени матрица сверхпереходной ЭДС i-го СД или АД, $\overset{\circ}{\mathbf{E}}''_i=U_{\text{б}}\cdot\mathbf{E}''_i=U_{\text{б}}\cdot(0\quad e''_i)^{\text{T}}$; e''_i – сверхпереходная ЭДС i-го СД или АД, *о. е.*);

5) формирование блочной квазидиагональной матрицы проводимостей $\overset{\circ}{\mathbf{A}}$:

$$\left[\overset{\circ}{A}_{ij}\right]=\begin{cases}\overset{\circ}{\mathbf{A}}_i, & i=j,\\ \mathbf{0}, & i\neq j,\end{cases}$$

где i – индекс структурного элемента, $j=\overline{1..i}$, $\overset{\circ}{\mathbf{A}}_i$ – приведенная к базисной ступени матрица проводимости i-го структурного элемента, $\overset{\circ}{\mathbf{A}}_i=k^2_{\text{пр}\,i}\cdot\mathbf{A}_i$ (в режиме КЗ в качестве матриц проводимостей элементов используются матрицы сверхпереходных значений проводимостей: $\overset{\circ}{\mathbf{A}}_i=k^2_{\text{пр}\,i}\cdot\mathbf{A}''_i$);

6) формирование УУН. Расчет напряжений в узлах системы:

$$\overset{\circ}{\mathbf{U}}=-\left(\mathbf{\Pi}\cdot\overset{\circ}{\mathbf{A}}\cdot\mathbf{\Pi}^{\text{T}}\right)^{-1}\cdot\mathbf{\Pi}\cdot\overset{\circ}{\mathbf{A}}\cdot\overset{\circ}{\mathbf{H}};$$

7) расчет токов в элементах системы: $\overset{\circ}{\mathbf{I}}=\overset{\circ}{\mathbf{A}}\cdot\left(\mathbf{\Pi}^{\text{T}}\cdot\overset{\circ}{\mathbf{U}}+\overset{\circ}{\mathbf{H}}\right)$;

8) расчет параметров ЭЭС предприятия (мощностей, моментов электродвигателей (ЭД), потокосцеплений) в конкретном установившемся режиме работы;

9) переход от приведенных значений параметров *i*-го элемента к реальным:

$$\mathbf{U}_i = 1/k_{\text{пр}\,i} \cdot \overset{\circ}{\mathbf{U}}_i , \quad \mathbf{I}_i = k_{\text{пр}\,i} \cdot \overset{\circ}{\mathbf{I}}_i ;$$

расчет действующих значений тока и напряжений для *i*-го элемента:

$$U_i = \sqrt{U_{id}^2 + U_{iq}^2} , \quad I_i = \sqrt{I_{id}^2 + I_{iq}^2} .$$

В отличие от известных методов приведения к базисному уровню (через коэффициенты трансформации последовательно соединенных трансформаторов), используемых при матрично-топологическом подходе, предложенный метод позволяет реализовать подключение к различным ступеням трансформации дополнительных источников ЭДС, а также учесть подпитку от двигательной нагрузки в аварийных режимах на различных ступенях трансформации схемы ЭС произвольной конфигурации.

На основе расчета стационарных (квазистационарных) режимов ЭЭС осуществляется расчет динамических режимов ЭЭС. Каждый элемент моделируется по отдельности, а влияние остальных элементов учитывается изменением напряжения, приложенного к данному элементу. Напряжение определяется по выражению (2) на каждом шаге численного интегрирования дифференциальных уравнений элементов ЭЭС.

В диссертационной работе предлагается перейти от «классического» функционала уравнений (2) к функционалу, содержащему большую информацию о техническом состоянии (ТС) элементов ЭТК (а не только номинальные (паспортные) параметры).

Особенность разработанного подхода к построению энергоинформационной модели ЭТК заключается в том, что информационное «насыщение» матриц осуществляется за счет расширения их размерности. Это, с одной стороны, дает возможность наполнения матриц нулевыми элементами. С другой стороны, использование особенностей такой конструкции расширенных матриц дает возможность автоматически использовать «расширенные» уравнения (2) для экспресс-решения отдельных задач функционирования элементов ЭТК (предусматривающих не только расчет и анализ режимов ЭЭС, но и оперативное изменение структурной топологии ЭЭС, автоматический расчет параметров противоаварийной автоматики (ПА), учет данных о ТС ЭО).

«Расширенная» система уравнений должна удовлетворять следующим основным требованиям:

1) возможность простыми аналитическими методами из «расширенной» системы уравнений получить систему уравнений (2);

2) наличие в «расширенной» системе уравнений всей необходимой информации о ТС элементов ЭТК, при этом под информацией понимается не только

численные значения переменных, но и функционал системы информационной поддержки управления ЖЦ элементов ЭТК.

Таким образом, энергоинформационную модель ЭТК можно представить в виде:

$$\hat{\mathbf{\Pi}}\mathbf{C}\hat{\mathbf{\Pi}}^{\mathrm{T}}\hat{\mathbf{U}} = \hat{\mathbf{\Pi}}\hat{\mathbf{W}} - \hat{\mathbf{\Pi}}'\hat{\mathbf{I}}, \tag{4}$$

где $\mathbf{C}$ – блочная квазидиагональная матрица состояния элементов ЭТК,

$$\mathbf{C} = \mathbf{A} \oplus \mathbf{M} \oplus \mathbf{X} \oplus \mathbf{P},$$

$\mathbf{A}$ – блочная квазидиагональная матрица проводимостей ветвей (в соответствии с (3)); $\mathbf{M}$ – блочная квазидиагональная матрица методов управления ЖЦ ЭТК,

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \mathbf{M}_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mathbf{M}_{22} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \ldots & \mathbf{M}_{nn} \end{pmatrix}; \tag{5}$$

$\mathbf{X}$ – блочная квазидиагональная матрица основных диагностируемых параметров элементов ЭТК,

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} \mathbf{X}_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mathbf{X}_{22} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \ldots & \mathbf{X}_{nn} \end{pmatrix}; \tag{6}$$

$\mathbf{P}$ – блочная квазидиагональная матрица, в ячейках которой находятся значения функций эффективности для элементов ЭТК в определенный момент времени,

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} \mathbf{P}_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mathbf{P}_{22} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \ldots & \mathbf{P}_{nn} \end{pmatrix}. \tag{7}$$

Введем линейные операторы $\boldsymbol{R}_1$, …, $\boldsymbol{R}_4$ для отображений $\mathbf{C}$ при анализе ключевых режимов управления ЖЦ ЭТК ПМСО:

1) расчет электрических режимов ЭЭС предприятия:

$$\boldsymbol{R}_1\,\mathbf{C} = \mathbf{A}. \tag{8}$$

Данному оператору $\boldsymbol{R}_1$ отвечает матрица проводимостей ветвей $\mathbf{A} = \oplus\sum_{i=1}^{n}\mathbf{A}_{ii}$. Уравнение (4) в этом случае трансформируется в уравнение (2). Данный режим является основным в энергоинформационной модели ЭТК ПМСО;

2) выбор методов управления ЖЦ ЭТК ПМСО:

$$\boldsymbol{R}_2\,\mathbf{C} = \mathbf{M}, \quad \mathbf{M} = \oplus\sum_{i=1}^{n}\mathbf{M}_{ii}, \tag{9}$$

где $\mathbf{M}_{ii} = \left[\mathbf{M}_{ii}^{(1)} \quad \mathbf{M}_{ii}^{(2)} \quad \ldots \quad \mathbf{M}_{ii}^{(k)}\right]^{\mathrm{T}}$ – вектор-столбец методов управления ЖЦ ЭТК; k – количество уровней управления ЖЦ ЭТК. Каждому из уровней соответствует своя подматрица методов $\mathbf{M}_{ii}^{(k)}(k,1) \in \mathbf{M}_{ii}$ (в соответствии с рисунком 3):

$$\mathbf{M}_{ii}^{(k)} = ES \cap DB \cap KB \cap CSDB \cap CSKB \cap PC \cap PS \cap HW \cap SW =$$

$$= \{es \in ES, db \in DB, kb \in KB, csdb \in CSDB, cskb \in CSKB, pc \in PC, ps \in PS, hw \in HW, \mathrm{sw} \in SW\},$$

где ES – стандарты предприятия; DB – базы данных; KB – базы знаний; $CSDB$ – СУБД; $CSKB$ – СУБЗ; PC, PS –технологические карты и регламенты; HW, SW – программно-техническое и математическое (алгоритмическое) обеспечение.

$$\mathbf{M}_{ii} := \begin{cases} \mathbf{M}_{ii}, & j = 1, \\ \mathbf{K} \cdot \mathbf{M}_{ii}, & j = 2 \ldots k, \end{cases} \quad j - \text{порядковый номер уровня управления ЖЦ ЭТК}, \quad (10)$$

$$\mathbf{K}_{k,k} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 1 & \cdots & \cdots & \cdots \\ \vdots & 1 & & & \vdots & & & \\ \vdots & & \ddots & & \vdots & & & \\ \vdots & & & 1 & \vdots & & & \\ 1 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 & \cdots & \cdots & \cdots \\ \vdots & & & & \vdots & 1 & & \\ \vdots & & & & \vdots & & \ddots & \\ \vdots & & & & \vdots & & & 1 \end{bmatrix} - j\text{-я строка}, \; j = 2 \ldots k,$$

j-й столбец

$$K_{fg} = \begin{cases} 1, \text{если } f = g \notin \{1; \quad j\} \\ 1, \text{если } f = 1, g = j \\ 1, \text{если } f = j, g = 1 \\ 0, \text{в остальных случаях} \end{cases}, \; j = 2 \ldots k.$$

В диссертационной работе обоснована целесообразность выделения следующих k уровней управления ЖЦ ЭТК, соответствующих уровням адекватности оценок о ТС элементов ЭТК для принятия решений по управляющим воздействиям.

Первый уровень (k = 1) соответствует идентификации ТС по параметру отказов или интенсивности восстановлений:

$$k = 1\text{: } \mathbf{M}_{ii} := \mathbf{M}_{ii}. \quad (11)$$

Второй уровень (k = 2) соответствует идентификации ТС по вероятностным характеристикам дефектов и повреждений, выявленных в определенные моменты времени:

$$k = 2\text{: } \mathbf{M}_{ii} := \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{M}_{ii}. \quad (12)$$

Третий уровень ($k = 3$) соответствует идентификации ТС по непрерывно контролируемым технологическим параметрам, характеризующим ТС элементов оборудования:

$$k = 3:\ \mathbf{M}_{ii} := \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{M}_{ii}; \qquad (13)$$

3) анализ основных диагностируемых параметров элементов ЭТК ПМСО:

$$\boldsymbol{R}_3\,\mathbf{C} = \mathbf{X}, \quad \mathbf{X} = \oplus\sum_{i=1}^{n}\mathbf{X}_{ii}; \qquad (14)$$

4) выбор функции эффективности для элемента ЭТК в определенный момент времени:

$$\boldsymbol{R}_4\,\mathbf{C} = \mathbf{P}, \quad \mathbf{P} = \oplus\sum_{i=1}^{n}\mathbf{P}_{ii}. \qquad (15)$$

Для решения поставленных задач по критерию взаимодействия в энергоинформационной модели проведена типизация элементов ЭТК ПМСО (таблица 1).

Таблица 1 – Типизация элементов ЭТК ПМСО по критерию взаимодействия в энергоинформационной модели

№	Тип элемента ЭТК ПМСО	Электроэнергетический признак	Признак наличия переменных магнитного поля	Механический признак	Информационный признак
1	Источники электрической энергии (промышленная или автономная сеть, генераторы)	+	+	+	+
2	Преобразовательные элементы, трансформаторы	+	+	-	+
3	Распределительные элементы (линии электропередачи, шинопроводы, реакторы)	+	-	-	+
4	Вращающиеся электрические машины	+	+	+	+
5	Статическая нагрузка	+	-	-	+
6	Механическая нагрузка, ГТУ, газопоршневые установки, насосные установки	-	-	+	+
7	Устройства управления и регулирования – ПА, коммутационная аппаратура	+	-	-	+
8	Устройства управления и регулирования (автоматические регуляторы возбуждения, системы автоматического регулирования ГТУ и др.)	-	-	-	+
9	Элементы активно-адаптивных сетей *SmartGrid*/ *MicroGrid* (*Smart Metering* (интеллектуальные счетчики), *Dynamic Grid Management* (динамическое управление миниэлектроэнергетическими системами), *Demand Response* (регулирование спроса))	+	-	-	+
10	Элементы *SCADA*-систем, телеметрия	-	-	-	+
11	Элементы *MDAC*, системы мониторинга и технической диагностики	-	-	-	+

Данная типизация соответствует структуре, представленной на рисунке 1. Элементы, представленные на поз.1–6, отвечают за формирование «силового канала» ЭТК. Элементы, представленные на поз.7–11, отвечают в основном за формирование информационного компонента.

<u>В третьей главе</u> представлена реализация энергоинформационной модели ЭТК ПМСО. Сформированы принципы построения энергоинформационной модели ЭТК ПМСО. Структурно предложенная схема представлена в виде следующих блоков (рисунок 4):

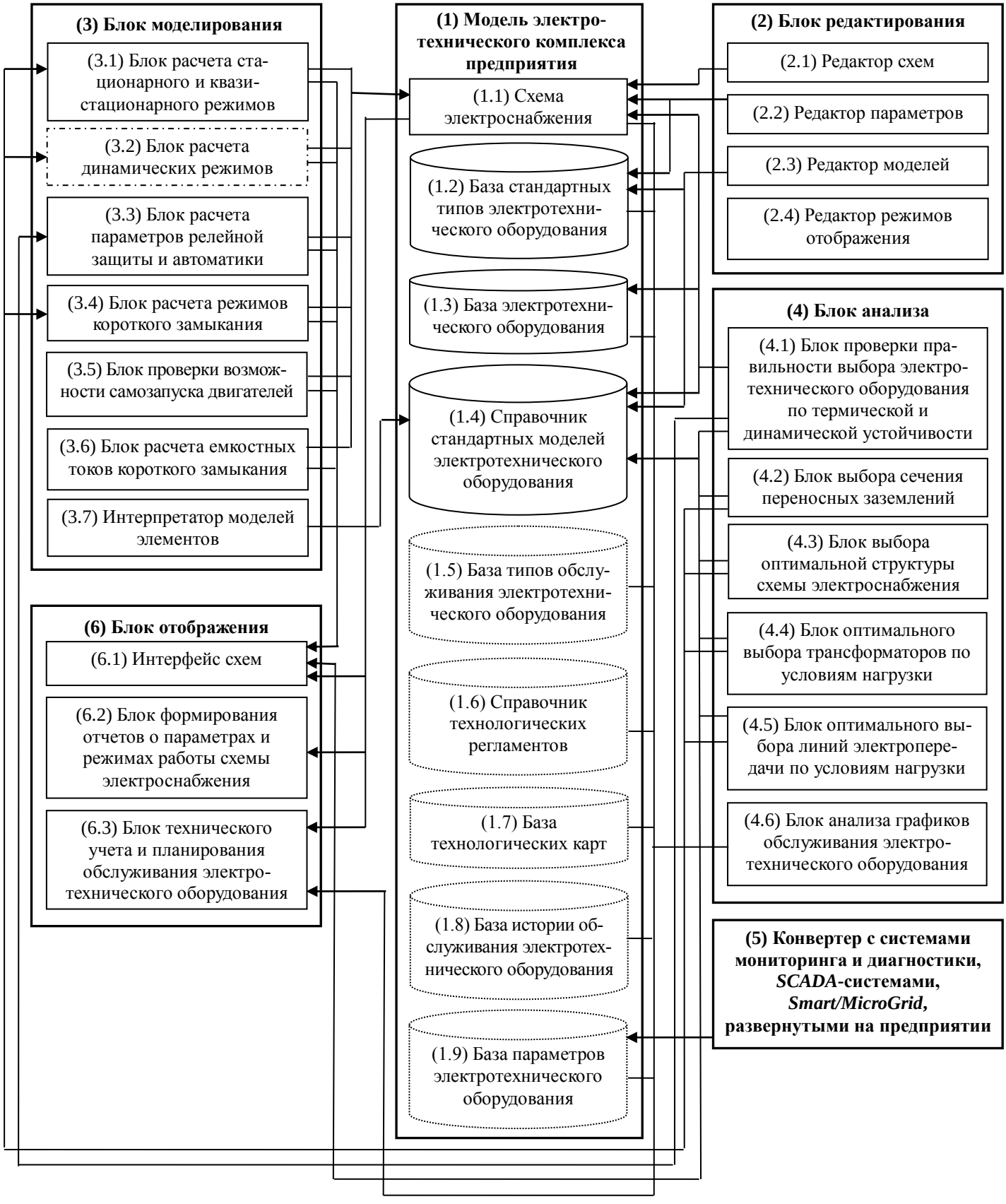

Рисунок 4 – Структура энергоинформационной модели ЭТК

(1) Модель ЭТК, обеспечивающая хранение математических моделей, технологических регламентов, параметров и характеристик различных типов ЭО и устанавливающая связи между элементами ЭТК ПМСО;

(2) Блок редактирования, обеспечивающий составление и редактирование моделей элементов и схем ЭС;

(3) Блок моделирования, обеспечивающий перевод математического описания модели в последовательность операций по моделированию различных режимов системы ЭС и расчету параметров релейной защиты и автоматики (РЗиА);

(4) Блок индикативного анализа и анализа комплекса мероприятий по обеспечению работоспособности ЭО;

(5) Конвертер с системами мониторинга и диагностики, *SCADA*-системами, *Smart/MicroGrid*, развернутыми на предприятии;

(6) Блок отображения, обеспечивающий графическое отображение элементов схемы ЭС, формирование отчетов, расчет межремонтных интервалов ЭО и определение типов обслуживания и материалов для них.

Элементы ЭТК упорядочены в определенную структуру, представленную на рисунке 5.

На основании предложенной модели уникальная идентификация каждого отдельного элемента системы возможна на основании трех полей: 1) тип оборудования, 2) стандартный тип оборудования, 3) элемент схемы ЭС.

Вид обслуживания представлен упорядоченным набором типов действий, определяющим проведение комплекса ТОиР для какого-либо элемента системы.

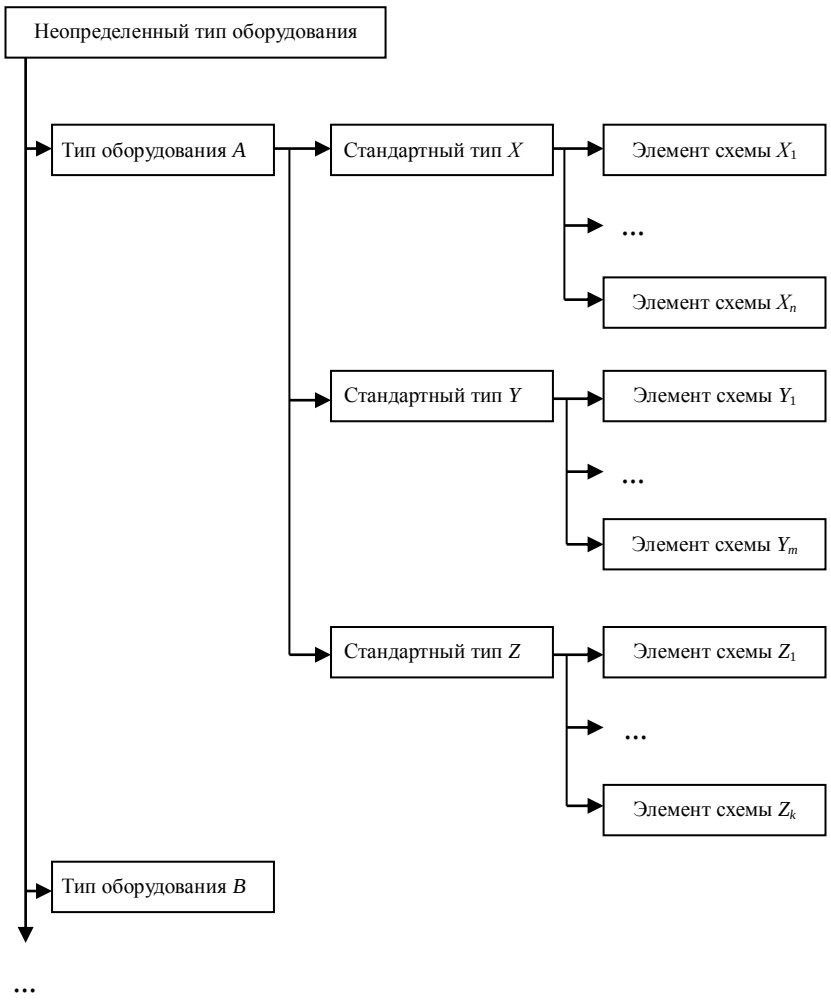

Рисунок 5 – Модель иерархии элементов ЭТК

Поля класса вида обслуживания определены, исходя из следующих принципов:

- комплекс типов действий в составе вида обслуживания упорядочен по определенным принципам в соответствии с классами составляющих его типов обслуживания и их показателями выполнения;

- периодичность выполнения каждого вида обслуживания может быть обусловлена фиксированным межремонтным периодом, зависимостью от другого вида обслуживания, а также сочетанием этих двух факторов;

- при возникновении необходимости внепланового ремонта дата следующего обслуживания может быть изменена.

Структура класса вида обслуживания представлена на рисунке 6.

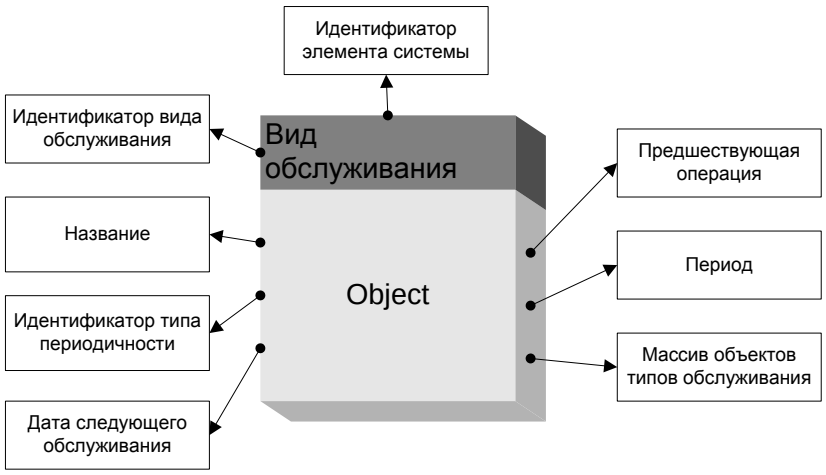

Рисунок 6 – Класс вида обслуживания

Для обеспечения вопросов замены, ТОиР (и впоследствии прогнозирования ТС элементов ЭТК) решена задача разработки моделей технологических операций при ТОиР различных типов ЭО ПМСО.

Например, для АД с короткозамкнутым ротором (КЗАД) до 1000 В было произведено их классифицирование на 48 подгрупп по скоростям и мощностям. Сформулирован набор укрупненных технологических операций по ТОиР КЗАД (таблица 2).

Для контрольных двигателей из сформированной классификации были проведены экспериментальные исследования. Для оценки полученных экспериментальных данных использовались вариационные ряды специализированных справочников[1, 2]. При сравнении дисперсий экспериментальных данных и данных справочников использовался *F*-критерий Фишера:

$$F = \sigma_1^2 / \sigma_2^2 , \qquad (16)$$

где σ_1^2 – большая дисперсия (при числе степеней свободы $df_1 = n_1 - 1$, n_1 – число вариантов); σ_2^2 – меньшая дисперсия (при числе степеней свободы $df_2 = n_2 - 1$,

[1] Нормы времени на ремонт электрооборудования для предприятий нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности / Отрасл. нормативно-исслед. станция территор. объединения «Башнефтехимзаводы». – Уфа, 1983.

[2] Сметные расценки на ремонт электродвигателей. Кн. 10. – Уфа, 1991.

n_2 – число вариантов). Для уровня значимости $p \geq 0{,}05$ значения критерия F составили 1,84 (при сравнении вариационных рядов экспериментальных данных и данных справочника[1]) и 1,83 (при сравнении с данными справочника[2]).

Таблица 2 – Набор технологических операций для КЗАД общепромышленного исполнения до 1000 В (для видов обслуживания «ремонт»)

№ п/п	Технологическая операция	Вид ремонта		
		капитальный	средний	текущий
1	Проверка технического состояния электродвигателя (корпус, заземление)			V
2	Проверка контактных соединений, изоляции и шпилек в барно			V
3	Замена смазки	V	V	V
4	Проверка обмотки статора на обрыв и замыкание мегоометром	V	V	V
5	Проверка элементов взрывозащиты	V	V	V
6	Разборка переднего подшипникового узла	V	V	
7	Разборка заднего подшипникового узла	V	V	
8	Извлечение ротора	V	V	
9	Дефектовка электродвигателя	V	V	
10	Промывка ротора, деталей и узлов	V	V	
11	Замена обмотки статора	V		
12	Ремонт ротора (напыление и токарная обработка)	V	V	
13	Ремонт подшипниковых щитов (напыление и токарная обработка)	V	V	
14	Балансировка ротора	V	V	
15	Монтаж ротора	V	V	
16	Сборка переднего подшипникового узла	V	V	
17	Сборка заднего подшипникового узла	V	V	
18	Испытание на стенде	V	V	
19	Ремонт и покраска корпуса	V	V	
20	Приемка, транспортировка на склад	V	V	
21	Демонтаж/монтаж муфты, кожуха, вентилятора	V	V	
22	Ревизия поста управления			V

Таким образом, при разработке модели обслуживания ЭД за базовые значения нормируемых характеристик двигателей приняты данные, полученные в результате эксперимента (выделены жирным шрифтом в таблице 3).

При выборе параметра оптимизации Y (нормы времени) и двух варьируемых факторов X_1 (мощность), X_2 (число оборотов в минуту) каждый фактор принимает значения в некотором указанном диапазоне. В результате для каждого момента моделируемого

Таблица 3 – Нормы времени на капитальный ремонт КЗАД общепромышленного исполнения до 1000 В, чел.·ч

Скорость, об./мин Мощность, кВт	750	1000	1500	3000
до 1	36,74	36,60	**36,24**	35,99
до 3	41,31	40,95	40,52	**40,16**
до 5	48,67	48,31	**47,85**	47,42
до 10	59,96	58,56	**57,92**	57,08
до 20	95,44	**94,51**	93,53	92,19
до 40	**102,98**	101,76	100,96	99,56
до 60	104,20	105,24	**103,75**	102,59
до 80	120,01	**118,99**	117,73	115,74
до 100	133,50	132,58	**130,93**	129,72
до 160	**280,19**	276,72	275,45	285,25
до 250	291,51	292,26	297,76	**305,47**
до 400	319,09	**331,13**	338,70	345,64

времени получается матрица, каждый элемент которой соответствует одной уникальной комбинации значений X_1, X_2. Геометрической интерпретацией такой таблицы является поверхность в трехмерном пространстве (рисунок 7).

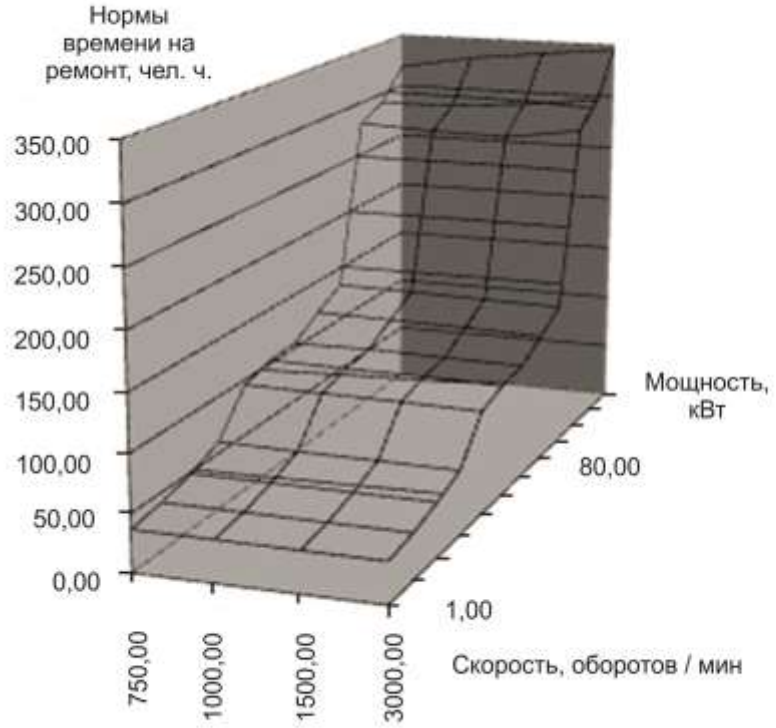

Рисунок 7 – Построение поверхности отклика расчетных норм времени на ремонт КЗАД общепромышленного исполнения до 1000 В

В соответствии с описанным алгоритмом получены нормируемые характеристики для остальных двигателей каждого из типов классификации (таблица 3).

Нормы времени на конкретные технологические операции по каждому из рассматриваемых классов АД рассчитываются из общих норм времени на капитальный ремонт, путем взятия процента (определенного экспериментально), соответствующего данной операции.

Данная методика используется для расчета норм времени для технологических карт по ТОиР различных типов элементов ЭТК ПМСО. База технологических карт (блок (1.7) на рисунке 4) рассматривается как структурно-информационный компонент производственных информационно-аналитических систем.

В четвертой главе разработаны методы оценки ТС ЭО в задачах повышения эффективности функционирования ЭТК ПМСО в условиях неопределенности и неполноты информации.

В состав учитываемых факторов (параметров) должны попадать лишь те, которыми можно реально управлять или варьировать в ходе эксплуатации на отраслевых предприятиях.

Оценка рисков отказа работы ЭО показывает, что в качестве риска можно определить безразмерную величину, равную весовому среднеквадратичному отклонению значений упорядоченного набора

изменяющихся во времени параметров ЭО.

Обозначим через ($x_1 \ldots x_n$) значения параметров, по которым определяется текущее состояние оборудования, ($x_1^0 \ldots x_n^0$) – оптимальные (допустимые, паспортные, выбранные) значения. Формула для вычисления риска имеет следующий вид:

$$R = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} k_i \cdot \left((x_i - x_i^0) / x_i^0 \right)^2}, \quad R \in [0;1], \tag{17}$$

где k_i – весовые коэффициенты, $k_i = a_{n-i}$, $i = 1, \ldots, n$, $\sum_{i=1}^{n} k_i = 1$.

Параметры a_n вычисляются как $a_n = \alpha \cdot r_n^{\gamma}$, где параметр γ учитывает различные факторы (например, значение функции отклика), параметр α выбирается из условия $\sum_{i=1}^{n} a_n = 1$ по формуле $\alpha = 1 \Big/ \sum_{i=1}^{n} r_i^{\gamma}$, r_i – ранг i-го параметра.

Вероятностная оценка отказов применима в основном для ЛЭП. Будем рассматривать ЛЭП как последовательность звеньев – линий и опор. Эксплуатационная характеристика (ЭХ) звена – это приведённая безразмерная величина, учитывающая прочность проводов, временной фактор, эксплуатационные условия и т.д.

Тогда функция распределения всей линии будет характеризоваться уравнением

$$F(x) = P(l < x), \tag{18}$$

где l – текущее значение эксплуатационной характеристики ЛЭП,
$l = \min\{l_1, l_2, \ldots, l_z\}$; z – количество звеньев, из которых состоит линия.

При экспоненциальном законе вероятности

$$F(x) = \begin{cases} 1 - e^{-\alpha z (x-l)}, & x > l, \\ 0, & x \le l, \end{cases} \tag{19}$$

где α – параметр настройки, равный значению функции отклика той линии, ЭХ которой минимальна.

Предполагается, что для новой линии $l = 1$, тогда $F(x) = 0$, то есть вероятность выхода из строя линии – нулевая. Текущее значение эксплуатационной характеристики для каждого звена ЛЭП находится по формуле:

$$l_i = 1 - e^{-\gamma_i (1-T_i)^2}, \; i = 1, \ldots, z, \tag{20}$$

где γ – параметр настройки, учитывающий различные факторы (в качестве этого параметра можно использовать значение функции отклика), T_i – параметр, учитывающий время эксплуатации i-го узла, $T_i = t_i / t_{i\,\max}$, t_i – текущее время эксплуатации узла i-го узла, $t_{i\,\max}$ – максимальный срок эксплуатации i-го узла.

Особенность **экспертной оценки состояния ЭО** заключается в том, что

эксперт не делает замеров, а на основании интуиции и опыта определяет, насколько хорошо функционирует оборудование. В этом случае каждому параметру эксперт ставит оценку от 0 до 1. Можно учесть для каждого параметра его вес. Веса также определяет эксперт. Таким образом, для n параметров получаем оценки w_1 , … , w_n. При идеальном состоянии оборудования каждому параметру соответствует 1. Общая оценка состояния S_v вычисляется по формуле

$$S_v = \sum_{i=1}^{n} v_i \cdot (1 - w_i), \text{ где } v_i - \text{заданные веса для параметров, } S_v \in [0;1]. \qquad (21)$$

Для каждого варианта или стратегии решений S_j , j = 1, … , k (k – число вариантов) необходимо дать оценку его эффективности по отношению к каждой цели. Оценка e_{ji} отражает степень достижения цели O_i при осуществлении варианта j и дается в интервале от нуля до единицы.

Оценка общей эффективности вычисляется по формуле

$$E_j = \sum_{i=1}^{k} e_{ji} \cdot v_i \,. \qquad (22)$$

В качестве оптимального варианта принимается тот, у которого оценка общей эффективности максимальна.

Используя известный подход проведения дробного факторного эксперимента (ДФЭ), сформируем для различных видов ЭО функции отклика в виде:

$$y = \beta_0 x_0 + \sum_{i=1}^{n} \beta_i x_i, \qquad (23)$$

где β_0, β_i – коэффициенты полинома; x_0 – фиктивный параметр (фактор), x_0 = 1; x_i – i-й параметр по перечню; n – число параметров в перечне.

Применяя регулярные дробные реплики от плана полного факторного эксперимента (ПФЭ) типа 2^{n-q}, где $q > 1$ (q – целое), запишем для k вариантов ($k = 2^{n-q}$) в матричной форме систему линейных уравнений:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{XB}, \qquad (24)$$

где $\mathbf{Y} = (y_1\ y_2\ \dots\ y_k)^{\mathrm{T}}$ – вектор результатов вариантов, $\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_{01} & x_{11} & \dots & x_{n1} \\ x_{02} & x_{12} & \dots & x_{n2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{0k} & x_{1k} & \dots & x_{nk} \end{pmatrix}$ – матрица кодированных параметров, $\mathbf{B} = (\beta_0\ \beta_1\ \dots\ \beta_n)^{\mathrm{T}}$ – вектор коэффициентов полинома.

Соответственно, коэффициенты полинома определяются как

$$\mathbf{B} = (\mathbf{X}^{\mathrm{T}}\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}^{\mathrm{T}}\mathbf{Y}. \qquad (25)$$

Далее, для матриц плана реплик ПФЭ типа 2^{n-q} $\overline{\mathbf{D}}^{\circ}_{n-q} = (x_{iu})$, i = 0, 1, … , n,

$u = 1, 2, \ldots, k$ определяются верхние и нижние уровни значений параметров и оптимальные значения из полученного диапазона.

Оценки параметров $\{\beta_i\}$ определяются с помощью метода наименьших квадратов: $\hat{\beta}_0 = \frac{1}{k}\sum_{u=1}^{k} y_u$, $\hat{\beta}_j = \frac{1}{k}\sum_{u=1}^{k} x_{ju} y_u$, где u – номер варианта.

Отбрасывая незначимые параметры по критерию Стьюдента и проверяя адекватность уравнения регрессии по критерию Фишера, можно получить грубую, но количественную модель объекта, обладающую известной достоверностью (доверительная вероятность критерия Фишера) и известной точностью, задаваемой при проверке значимости.

На основе экспериментальных и отчетных данных сформированы основные диагностируемые параметры и функции эффективности для ЭО ПМСО.

АД и СД. Анализ показал, что на отраслевых предприятиях достаточно развитыми являются системы виброконтроля и вибродиагностики основного технологического оборудования. Современные системы вибродиагностики позволяют также учитывать влияние на электропривод технологических параметров (производительность, температура, давление и т. д.). Целесообразным представляется характеризовать ТС ЭД экспертными оценками следующих параметров:

$$X_{ЭД} = \{x_1, \ldots, x_6\}, \qquad (26)$$

где x_1 – сопротивление изоляции обмоток; x_2, x_3, x_4 – вибрация по вертикальному, поперечному и осевому направлениям; x_5 – неравномерность воздушного зазора; x_6 – величины зазоров в подшипниках скольжения.

Текущие значения параметров хранятся в блоке (1.9) модели электротехнического комплекса (рисунок 4). Общая оценка состояния ЭД S_v рассчитывается в соответствии с формулой (21) (будем считать, что оптимальные значения, ранги и веса остаются такими же в различные периоды времени).

Комплектные трансформаторные подстанции (КТП). ТС КТП целесообразно характеризовать по формуле (17) оценкой риска отказа по следующим параметрам:

$$X_т = \{x_1, \ldots, x_6\}, \qquad (27)$$

где x_1 – уровень масла в баке; x_2 – температура верхних слоёв масла; x_3 – состояние индикаторного силикагеля; x_4 – нагрев контактов; x_5 – вибрация; x_6 – уровень напряжения.

Цели проведения оценки технического состояния КТП: $O_т = \{O_1, O_2, O_3\}$, где O_1 – максимум надёжности; O_2 – минимум временных затрат на замену или ремонт; O_3 – учет ограничений из-за сезонной зависимости.

Для оценивания параметров (27) используется, в соответствии с (24), дробный факторный план типа 2^{6-3}, задаваемый генерирующими соотношениями $x_4 = x_1x_2$, $x_5 = x_1x_3$, $x_6 = x_2x_3$.

Комплексная оценка эффективности для КТП рассчитывается по формуле (22) с учетом экспертной расстановки рангов целей при оценке ТС КТП. Подставляя необходимые данные в (17), находятся значения риска отказов работы КТП в различные моменты времени.

Воздушные линии (ВЛ) электропередачи. ТС ВЛ характеризуется вероятностной оценкой в соответствии с (18)–(20) по следующим параметрам:

$$X_{\text{вл}} = \{x_1, \ldots, x_4\}, \qquad (28)$$

где x_1 – отклонение опоры вдоль ВЛ; x_2 – отклонение опоры поперёк ВЛ; x_3 – коэффициент дефектности; x_4 – избыточная температура.

Цели проведения оценки технического состояния ВЛ: $O_{\text{ВЛ}} = \{O_1, O_2\}$, где O_1 – максимум надёжности; O_2 – минимум временных затрат на замену или ремонт.

Для оценивания параметров (28) используется, в соответствии с (24), дробный факторный план типа 2^{4-1}, задаваемый генерирующим соотношением $x_4 = x_1x_2$.

Комплексная оценка эффективности для ВЛ рассчитывается по формуле (22) с учетом экспертной расстановки рангов целей при оценке ТС ВЛ. Значения ЭХ l каждого узла ВЛ находятся при подстановке полученных значений функции отклика в формулу (20). Наименьшее из полученных значений ЭХ узлов подставляется в формулу (19). Задавая необходимый уровень ЭХ, оператор вычисляет вероятность отказа ВЛ в различные периоды времени.

Анализ результатов моделирования приближающих функций для основного электротехнического оборудования ЭТК ПМСО. Задача нахождения аналитических зависимостей функций эффективности для ЭО соответствует постановке задачи интерполяции. По полученной таким образом кривой устанавливается вид приближающей функции. После того как вычислены ошибки ε_i, $\varepsilon_i = y_i - F(x_i, a, b, m)$, y_i – табличное значение исходной функции в точке x_i; $F(x_i, a, b, m)$ – значение аппроксимирующей функции в точке x_i; i – количество точек, $i = 1, \ldots, n$; a, b, m – переменные, в качестве приближающей функции берётся та, для которой ошибка наименьшая.

Оценка погрешности приближения при использовании метода средних квадратов находится как

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{n} \frac{\left(y_i - F(x_i, a, b, m)\right)^2}{\sigma_y^2}, \text{ где } \sigma_y^2 = \frac{1}{n-2}\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - F(x_i, a, b, m)\right)^2. \qquad (29)$$

Анализ результатов моделирования приближающих функций показал, что наименьшую ошибку приближения для ЛЭП дает гиперболическая функция, для КТП – линейная функция, для ЭД – логарифмическая функция.

Погрешность аппроксимации экспериментальных данных приближающими функциями не превышает 5 %.

Пятая глава посвящена моделированию этапов ЖЦ ЭТК ПМСО на основе метода генетического алгоритмирования (ГА) и принципов организации экспертной оценки факторов риска отказов ЭО.

Жизненный цикл любого элемента ЭТК можно рассматривать с позиций эволюции. Процесс развития технического объекта задается конкретным временным отрезком, величина которого может быть согласована с регламентированной эксплуатационной документацией. Объект вводится в эксплуатацию и характеризуется некоторыми начальными условиями (комплексными показателями надежности).

В качестве генов хромосом принимаются соответствующие методики обслуживания и контроля ТС оборудования. Каждое мероприятие вида обслуживания для разных методик может проводиться по-разному (это и является различием в генах).

В диссертационном исследовании введены операции ГА: **репродукция** (стандартизация методик обслуживания и принятия решений по сопровождению и контролю ТС ЭО), **кроссинговер** (усовершенствование методик контроля и обслуживания ЭО на основе экспертных оценок и других видов анализа), **мутация** (воздействие факторов условий окружающей среды и уровня квалификации обслуживающего персонала на эксплуатацию ЭО), **инверсия** (прекращение сотрудничества с обслуживающей организацией).

Функция приспособленности (фитнес-функция) ГА рассматривается как критерий оптимальной оценки. Для решения P_1 из популяции возможных решений P фитнес-функция определится как

$$\omega(P_1) = |n\text{-}m|, \qquad (30)$$

где n и m – текущее и оптимальное значения выбранного показателя надежности.

По аналогии с функцией надежности функция ЖЦ элемента ЭТК $R'(t)$ должна обеспечивать максимальное стремление к заданным условиям, т.е. модель оптимальной эксплуатации должна обеспечивать поддержание заданных показателей на должном уровне:

$$R'(t) = R_0 - (A(p) + B(p) + C(p) + M(p) + ...) \le 0, \qquad (31)$$

где R_0 – заданная надежность, $A(p)$, $B(p)$, $C(p)$, $M(p)$ – доли надежности, обеспечиваемые различными мероприятиями: $A = \{a_1, a_2, a_3\}$ – мероприятия по получению информации, a_1 – аварийный контроль, a_2 – мониторинг и визуальный осмотр, a_3 – диагностика с применением специальных приборов инфракрасного и ультрафиолетового контроля, $B = \{b_1, b_2, b_3\}$ – подходы к анализу и оценке ТС ЭО, b_1 – анализ ТС ЭО на основе оценки рисков отказа

работы ЭО, b_2 – анализ ТС ЭО на основе вероятностной оценки отказов, b_3 – анализ ТС ЭО на основе экспертных оценок, $C = \{c_1,\ c_2,\ c_3\}$ – профилактические и ремонтные мероприятия, c_1 – обслуживание ЭО «по авралу», c_2 – обслуживание ЭО на основе графика планово-предупредительного ремонта (ППР), c_3 – обслуживание ЭО в рамках системы обеспечения заданного технического состояния, $M = \{m_1,\ m_2,\ m_3\}$ – методы управления ЖЦ ЭТК в соответствии с выражением (9).

Каждая из групп мероприятий обеспечивает свой некоторый уровень выбранного показателя. Начальные условия задаются, исходя из имеющихся основных показателей надежности различных типов ЭО. В качестве дискрета времени принимается время от начала эксплуатации до первого отказа ЭО, в качестве критерия – значение показателя наработки на отказ $t_{\max}$ для данного вида ЭО. Чем выше значение критериальной функции, тем оптимальнее подходы к ТОиР ЭО, тем оптимальнее набор методик, обеспечивающих это обслуживание и их содержание.

В диссертационной работе сформирован набор базовых эвристик проведения ТОиР ЭО ПМСО с применением метода ГА.

Шестая глава посвящена разработке научно-технических решений и мероприятий, обеспечивающих повышение эффективности функционирования ЭТК ПМСО. В диссертационном исследовании разработаны: методика интегрированной логистической поддержки этапов ЖЦ ЭТК; рекомендации по управлению эксплуатационной документацией, обеспечивающей эффективное функционирование ЭТК ПМСО; система информационной поддержки управления (СИПУ) ЖЦ ЭО; методика оценки организационно-технических мероприятий, направленных на повышение эффективности функционирования ЭТК.

ЭО, входящее в состав ЭТК, необходимо рассматривать не только с позиций его эксплуатации, но и с позиций его проектирования, производства и испытания, в процессе которых и были заложены основные критерии, технические характеристики, показатели надежности, режимы ЭЭС и другие аспекты, которыми приходится оперировать при эксплуатации. Использование энергоинформационной модели ЭТК обеспечивает единое информационное пространство в задачах комплексного контроля и сопровождения ЭТК на этапах его ЖЦ.

Математический аппарат СИПУ ЖЦ ЭО ориентирован на решение следующего класса задач: а) организационных, б) конструктивных (рациональный выбор совокупности контрольных параметров, автоматизация контроля и индикация неисправностей, возможность оперативного анализа ТС ЭО в режиме онлайн), в) эксплуатационных (повышение квалификации обслуживающего персонала, обоснование объёма и сроков проведения ТОиР, профилактических ра-

бот) (рисунок 8).

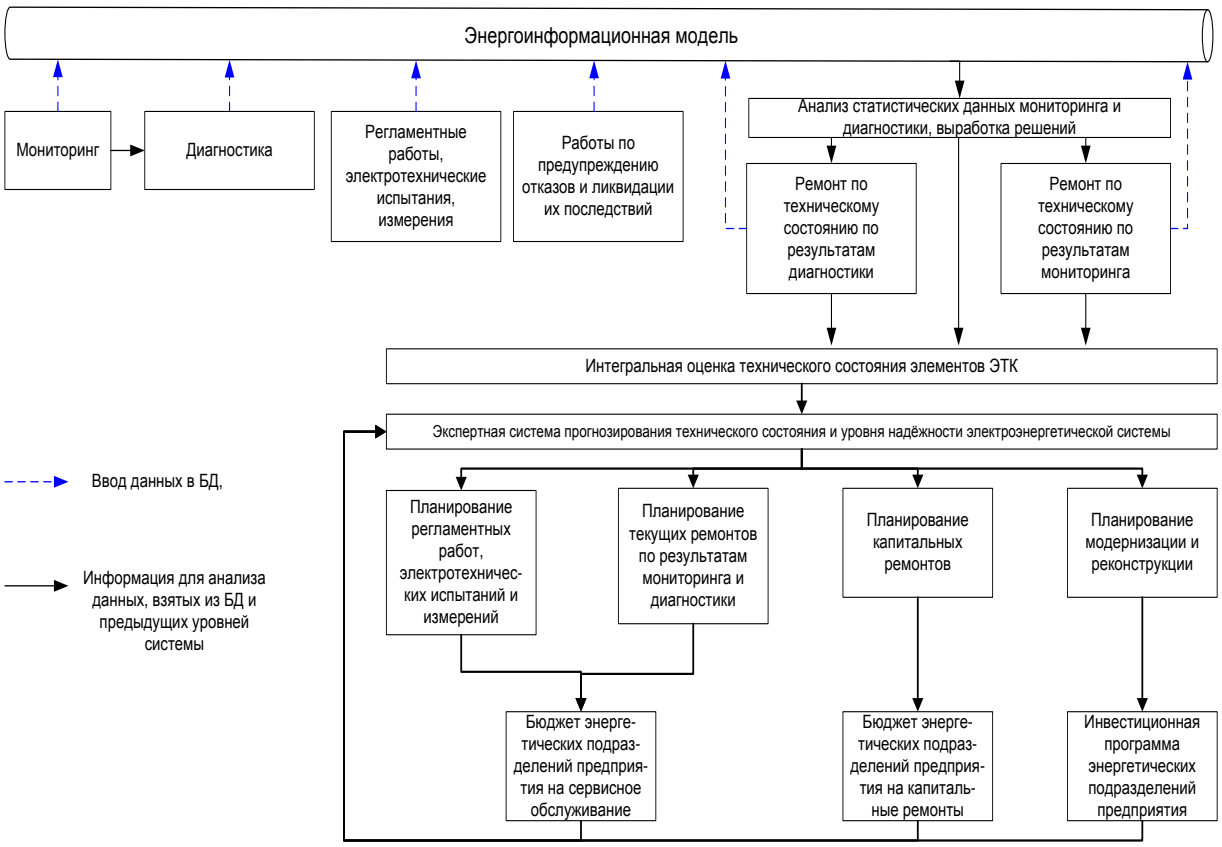

Рисунок 8 – Схема информационного обеспечения и поддержки этапов управления жизненным циклом ЭТК ПМСО

Программная реализация алгоритмов СИПУ ЖЦ ЭО состоит из следующих процедур:

1. Расчет энергоинформационной модели (на основе расчета стационарных (квазистационарных) режимов ЭЭС).
2. Формирование и ранжирование целей, которым должно удовлетворять ЭО.
3. Синхронизация энергоинформационной модели с информационно-аналитическими системами, развернутыми на предприятии. Выгрузка данных из баз данных и справочников (методов измерения, приборов, параметров, типов оборудования) из информационно-аналитических систем.
4. Вычисление оптимального значения для каждого показателя. Вычисление границ для верхнего, среднего и нижнего уровней.
5. Расчет комплексной оценки эффективности по вариантам (в соответствии с (22)).
6. Расчет коэффициентов регрессии для функции, характеризующей степень соответствия текущего состояния ЭО заданным целям. Проверка модели на воспроизводимость по *G*-критерию Кохрена. Проверка коэффициентов регрессии на значимость по критерию Стьюдента. Проверка адекватности уравнения

регрессии по *F*-критерию Фишера.

7. Формирование отчетных документов, трендов, характеризующих параметры безотказной работы элементов, планов-графиков ППР, ведомостей, формуляров, и др.

Разработанная СИПУ ЖЦ ЭТК ПМСО позволяет рассчитать тренды, характеризующие параметры безотказной работы элементов, и сопоставлять зависимость уровня технического состояния ЭО от уровня финансирования с прогнозированием возникающих рисков «технологической недоотдачи».

Пример главного окна программного комплекса, внедренного на предприятии ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ», представлен на рисунке 9. Программный комплекс позволяет настраивать отчетные формы в удобном для оператора виде, а также экспортировать их в любые офисные приложения для работы с документами (рисунок 10).

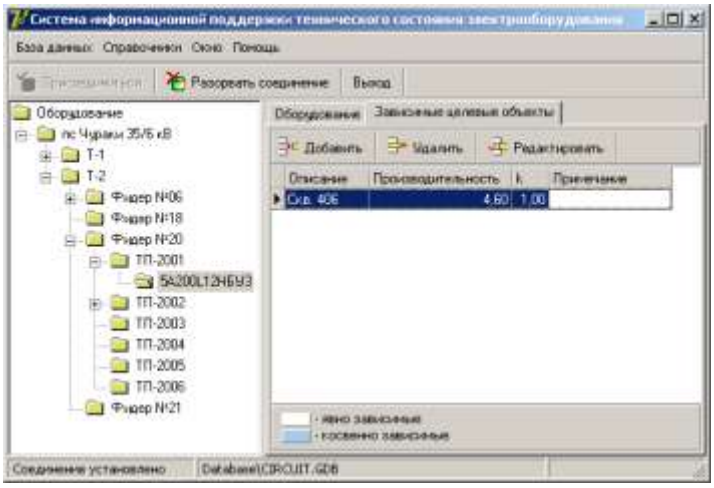

Рисунок 9 – Главное окно СИПУ ЖЦ ЭО

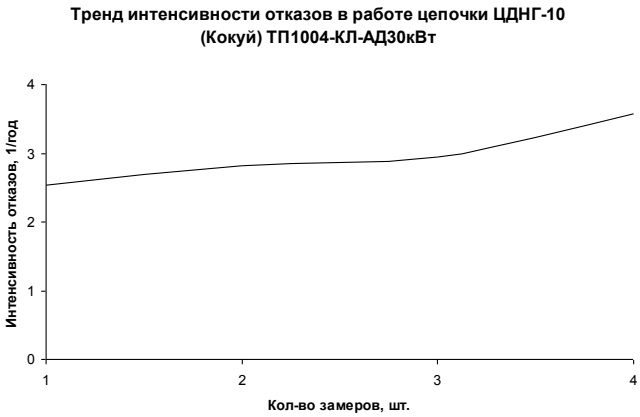

Рисунок 10 – Пример экранной формы СИПУ ЖЦ ЭО

В таблице 4 приведен пример вывода вероятного времени простоя технологических цепочек нефтяного месторождения при нештатных ситуациях на участках системы электроснабжения.

Таблица 4 – Вероятное время простоя технологических цепочек месторождения

Цепочка нефтепромысла	Номер скважины	Вероятное время простоя, ч	Дебит скважины, т/сут
Тр-р №1 ПС «Чураки» 35/6 – Фид. №19 – ТП-1901 – АД	112	12	3,2
Тр-р №1 ПС «Чураки» 35/6 – Фид. №19 – ТП-1904 – АД	64	17	4,8
Тр-р №1 ПС «Чураки» 35/6 – Фид. №19 – ТП-1906 – АД	10	12	39
Тр-р №1 ПС «Чураки» 35/6 – Фид. №19 – ТП-1906 – АД	30	20	11,3
Тр-р №1 ПС«Чураки» 35/6 – Фид. №19 – ТП-1910 – АД	76	16	52

Разработанная методика оценки организационно-технических мероприятий, направленных на повышение эффективности функционирования электротехнических комплексов, позволяет определить стоимость этапов по проведению изменений в энергетических подразделениях отраслевых и межотраслевых

предприятий и эффекты (в качественной и количественной оценке) от внедрения этапов.

Заключение

В диссертационной работе решена важная научная проблема повышения эффективности функционирования электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли, заключающаяся в разработке теоретических положений, развитии методологии исследования и оценки состояний, моделирования режимов функционирования электротехнических комплексов с учетом горно-геологических, климатометеорологических, территориальных и иерархических условий и факторов, в том числе связанных с неопределенностью и неполнотой информации.

Основные научные выводы и результаты, полученные лично автором:

1. Созданы методология и теоретические основы оценки состояний и моделирования режимов функционирования электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли на основе принципов и способов организации автоматизированного формирования математического описания электротехнических систем сложной структуры, в том числе в условиях неопределенности и неполноты информации.

2. Разработаны метод и алгоритмы оперативного анализа режимов функционирования ЭТК ПМСО, включающие: расчеты электроэнергетических параметров текущего и прогнозного состояний режимов ЭТК; установление методов управления и определение их траекторий для элементов ЭТК на различных этапах жизненного цикла; выбор и определение основных диагностируемых параметров элементов ЭТК; определение функций эффективности для элементов ЭТК в заданные моменты времени.

3. Синтезирована энергоинформационная модель электротехнического комплекса на основе матрично-топологического подхода.

4. Установлены иерархическая структура и база моделей элементов ЭТК, сопоставимые с методами и алгоритмами оперативного анализа режимов функционирования электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли.

5. Установлена база диагностических признаков элементов электротехнических комплексов ПМСО, отражающих временной, факторный и комбинированный аспекты, и использование которых обеспечивает эффективные оценки и прогноз состояния элементов ЭТК с адаптацией к изменению горно-геологических, климатометеорологических, а также территориальных и иерархических условий и факторов.

6. Сформированы функции эффективности для элементов ЭТК ПМСО и

разработана методика оценки прогнозного технического состояния ЭО.

7. Разработан подход, основанный на новой трактовке генетических операций и формализации генетических алгоритмов применительно к моделированию процессов проектирования, производства и эксплуатации, соответствующих различным этапам жизненного цикла элементов электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли.

8. Разработана гибкая информационно-программная среда для управления состоянием элементов электротехнических комплексов на различных этапах жизненного цикла, совместимая с информационно-аналитическими системами производства.

9. Разработаны и внедрены учебные пособия, интерактивные электронные образовательные ресурсы и технические руководства на отраслевых предприятиях и в учебный процесс Пермского национального исследовательского политехнического университета.

10. Проведена апробация основных положений диссертации во внедренных в производство нормативно-технических документах по оценке ТС ЭО, по проведению организационно-технических мероприятий по повышению эффективности функционирования ЭТК ПМСО, а также при использовании в учебном процессе.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

в научной монографии:

1. Винокур В.М., Кавалеров Б.В., **Петроченков А.Б.**, Сапунков М.Л. Математическое моделирование газотурбинных мини-электростанций и мини-энергосистем: моногр. – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2010. – 299 с.

в изданиях, рекомендованных ВАК России для докторских диссертаций:

2. Винокур В.М., Кавалеров Б.В., **Петроченков А.Б.** Программный комплекс для математического моделирования автономных мини-электростанций // Электричество. – 2007. – № 3. – С.2–7.

3. Хорошев Н.И., **Петроченков А.Б.**, Ромодин А.В. Экспертный метод оценки надежности электротехнического оборудования при принятии управленческих решений // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2009.– № 4 (44). – С.161–164.

4. Елтышев Д.К., **Петроченков А.Б.**, Бочкарев С.В. К вопросу о применении генетических алгоритмов для решения задач поддержки жизненного цикла электрооборудования // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2009. – № 2 (20). – С.136–142.

5. **Петроченков А.Б.,** Ромодин А.В., Хорошев Н.И. Об одном формализованном методе оценки управленческих решений (на примере управления электротехническими объектами) // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2009. – № 5 (87). – С.166–171.

6. Даденков Д.А., **Петроченков А.Б.** Опыт создания лабораторно-тренажерного

комплекса для подготовки специалистов в области автоматизированных систем управления технологическими процессами // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2009. – № 5 (87). – С.251–255.

7. Шигапов А.А., **Петроченков А.Б.**, Кавалеров Б.В.Структурная схема математической модели системы электроснабжения для испытания алгоритмов управления // Электротехника. – 2010. – № 6. – С.55–60.

8. Кавалеров Б.В., **Петроченков А.Б.** Математическое моделирование газотурбинных мини-электростанций и мини-энергосистем // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2010. – № 6. – С.19–23.

9. **Петроченков А.Б.,** Солодкий Е.М. К вопросу о подходах к анализу надежности сложных систем // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2011. – № 3 (121). – С. 214–218.

10. **Петроченков А.Б.,** Бочкарев С.В., Ромодин А.В., Елтышев Д.К. Планирование процесса эксплуатации электротехнического оборудования с использованием теории марковских процессов // Электротехника. – 2011. – № 11. – С.20–24.

11. Казанцев В.П., **Петроченков А.Б.**, Ромодин А.В., Хорошев Н.И. Некоторые аспекты технологии эксплуатации электротехнических объектов на основе методов краткосрочного прогнозирования технического состояния // Электротехника. – 2011. – № 11. – С.28–34.

12. **Петроченков, А.Б.** Об управлении жизненным циклом электротехнических комплексов в нефтедобыче // Электротехника. – 2012. – № 11. – С.40а–48.

13. **Петроченков А.Б.** О подходах к оценке технического состояния электротехнических комплексов и систем // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2012. – № 12. – С.16–21.

14. **Петроченков А.Б.**, Ромодин А.В. Разработка подходов к построению комплекса «Энергооптимизатор» // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2013. – № 4. – С.20–25.

15. **Петроченков А.Б.,** Ромодин А.В., Кавалеров Б.В. К вопросу внедрения системы информационной поддержки управления жизненным циклом электротехнических комплексов нефтедобывающих предприятий // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2013. – № 4–2 (183). – С.236–243.

16. **Петроченков А.Б.,** Кычкин А.В., Темичев А.А. Интегрированная диагностическая поддержка распределенной системы мониторинга энергоданных // Автоматизация и современные технологии. – 2014. – № 9. – С.10–16.

17. **Петроченков А.Б.** Энергоинформационная модель электротехнических комплексов промышленных предприятий // Электротехника. – 2014. – № 11. – С.47–51.

18. **Петроченков А.Б.**, Ромодин А.В., Кычкин А.В. Организация информационно-измерительной и управляющей системы локальной интеллектуальной электроэнергетической сети // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2014. – Т. 12. – № 9. – С. 4–11.

19. **Петроченков А.Б.**, Бочкарев С.В., Овсянников М.В., Буханов С.А. Построение онтологической модели жизненного цикла электротехнического оборудования // Электротехника. – 2015. – № 6. – С.19–25.

в изданиях, входящих в систему цитирования SCOPUS:

20. **Petrochenkov A.B.,** Romodin A.V. Energy-optimizer complex // Russian Electrical Engineering. – 2010. – Vol. 81, No. 6. – P.323–327. (**DOI: 10.3103/S106837121006009X**).

21. Kavalerov B.V., **Petrochenkov A.B.** Simulating Electric Load to Adjust Systems of

Control of Converter Gas-Turbine Plants // Russian Electrical Engineering. – 2011. – Vol. 82, No.11. – P.582–587. **DOI: 10.3103/S1068371211110034**.

22. **Petrochenkov A.B.**, Solodkii E.M. On the Methods for Constructing Failure Models of Complex Systems // Russian Electrical Engineering. – 2011. – Vol. 82, No.11. – P.623–627. **DOI: 10.3103/S1068371211110125**.

23. Kavalerov B.V., **Petrochenkov A.B.**, Odin K.A., Tarasov V.A. Modeling of the Interaction of Structural Elements // Russian Electrical Engineering. – 2013. –Vol. 84, No. 1. – P.9–13. **DOI: 10.3103/S1068371213010033**.

24. **Petrochenkov A.B.** On the Problem of Development of Models of Processing Operations Performed during Repair of Electrical Engineering Complex Components // Russian Electrical Engineering. – 2013. – Vol. 84, No. 11. – P. 613–616. **DOI: 10.3103/S1068371213110096**.

25. **Petrochenkov A.B.**, Frank T., Romodin A.V., Kychkin A.V. Hardware in the Loop Simulation of an Active Adaptive Power Grid // Russian Electrical Engineering. – 2013. – Vol. 84, No. 11. – P.652–658. **DOI: 10.3103/S1068371213110102**.

26. Tarasov V.A., **Petrochenkov A.B**., Kavalerov B.V. The Problem of Switching Elements in Computer Modeling Of Power Systems // Russian Electrical Engineering. – 2014. – Vol. 85, No. 11. – P. 654–656. **DOI: 10.3103/ S1068371214110133**.

27. Kavalerov B.V., **Petrochenkov A.B.**, Odin K.A., Tarasov V.A. A method for development of software packages for mathematical simulation of electric power systems // Russian Electrical Engineering. – 2015. – Vol.86, No. 6. – P.331–338. **DOI: 10.3103/S1068371215060085**.

28. Bochkarev S.V., Ovsyannikov M.V., **Petrochenkov A.B.**, Bukhanov S.A. Structural synthesis of complex electrotechnical equipment on the basis of the constraint satisfaction method // Russian Electrical Engineering. – 2015. – Vol.86, No. 6. – Pp.362–366. **DOI: 10.3103/S1068371215060024**.

29. **Petrochenkov A.B.** Management of effective maintenance of the electrotechnical complexes of mineral resource industry's enterprises based on energy-information model // IEEE Conference Publications. Proceedings of XVIII International Conference on Soft Computing and Measurements SCM`2015. – 2015. – P.122–124. **DOI: 10.1109/SCM.2015.7190430**.

в рецензируемых журналах, сборниках научных трудов:

30. **Петроченков А.Б.** Концепция системы обеспечения заданного технического состояния объектов электроснабжения промышленных предприятий // Annual Proceedings of Technical University in Varna. – Varna, 2004. – P.357–362.

31. Iarmonova O., **Petrochenkov A.**, Krause B. Development of Gas Turbine Fast Mathematical Model Simulation Module for Software Complex «Electrodin» based on LabVIEW // European Researcher. – 2013. – Vol.(61), № 10–2. – P.2488–2501. **DOI: 10.13187/issn.2219-8229**.

32. **Petrochenkov A.** Respecting Life Cycle Management of Electrotechnical Equipment Based on Genetic Modeling Methods // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 792. – P.113–121. **DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.792.113**.

в сборниках материалов, трудах конференций:

33. **Петроченков А.Б.**, Ромодин А.В., Казанцев В.П. Обеспечение толерантности электроэнергетических систем на основе информационно-аналитических сред принятия решений // Энергетика, материальные и природные ресурсы. Эффективное использование. Собственные источники энергии: Материалы III междунар. науч.-практ. конф. – Пермь: Изд-во «Астер», 2007. – С.133–137.

34. **Петроченков А.Б.** Ромодин А.В., Кухарчук А.В., Косотуров И.М. Автоматизация испытаний асинхронных машин по безнагрузочной методике // Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments: Сб. трудов VIII междунар. науч.-практ. конф. – М.: РУДН, 2009. – С. 423–425.

35. **Петроченков А.Б.** Теоретические основы управления жизненным циклом электротехнических комплексов нефтедобывающих предприятий // Труды VII Междунар. (XVIII Всерос.) науч.-техн. конф. по автоматизированному электроприводу / Иванов. гос. энергет. ун-т им. В.И. Ленина». – Иваново, 2012. – С.642–647.

36. **Петроченков А.Б.**, Гладков В.К. Разработка методики обслуживания комплектных трансформаторных подстанций на нефтедобывающих предприятиях // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сб. науч. трудов I Междунар. (IV Всерос.) науч.-техн. конф. – Уфа: Нефтегазовое дело, 2013. – С.169–173.

37. **Petrochenkov A.** Methodical Bases of the Integrated Electrotechnical Complexes Life Cycle Logistic Support // Proceedings of 1st International Conference on Applied Innovations in IT / Eduard Siemens (editor in chief) et al. Dessau, Anhalt University of Applied Sciences, 2013. – P.7–11. **DOI: 10.13142/kt10001.02**.

38. **Petrochenkov A.** Regarding to Implementation of Genetic Algorithms in Life Cycle Management of Electrotechnical Equipment //Proceedings of 2nd International Conference on Applied Innovations in IT / Eduard Siemens (ed. in chief) [et al]. – Koethen, Anhalt University of Applied Sciences, 2014. – P.79–83. **DOI: 10.13142/kt10002.13.**

39. **Петроченков А.Б.** Развитие теории и совершенствование методов обеспечения эффективного функционирования электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли // Труды VIII Междунар. (XIX Всерос.) конф. по автоматизир. электроприводу АЭП-2014. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – Т. 2. – С.442–446.

40. **Petrochenkov A.** Practical Aspects of Genetic Algorithms' Implementation in Life Cycle Management of Electrotechnical Equipment // Proceedings of the 3rd International Conference on Applied Innovations in IT (2015). Jg. III. – Koethen: Hochschule Anhalt, 2015. – P.1–6. **DOI: 10.13142/kt10003.01**.

Патент, свидетельства о регистрации баз данных и программ для ЭВМ:

41. Пат. № 2502974 РФ, МПК G01M 15/00. Способ определения остаточного ресурса технических объектов / С.В. Бочкарев, А.И. Цаплин, М.В. Овсянников, С.А. Буханов, **А.Б. Петроченков** [и др.]. – № 2012129075/28 (045549); заявл. 10.07.2012; опубл. 27.12.2013, Бюл. № 36. – 9 с.

42. Св-во об офиц. регистр. программы для ЭВМ № 2004611133 РФ. Программный комплекс «Расчет устойчивости систем электроснабжения» / Винокур В. М., Ромодин А. В., **Петроченков А. Б.** [и др.]; зарег. в реестре программ для ЭВМ; заяв. 13.04.2004; № 2004610836; опубл. 07.05.2004. РОСПАТЕНТ.

43. Св-во об офиц. регистр. программы для ЭВМ № 2005612141 РФ. Программа «Power System Supply» // Винокур В. М., **Петроченков А. Б.** [и др.]; зарег. в реестре программ для ЭВМ; заяв. 05.07.2005; № 2005611666; опубл. 19.08.2005. РОСПАТЕНТ.

44. Св-во об офиц. регистр. программы для ЭВМ № 2007611452 РФ. Программа «Система информационной поддержки управления жизненным циклом электротехнического оборудования ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» // Гладков В. К., Чекменев В. А., Зубарев С. Ю., **Петроченков А. Б.** [и др.]; зарег. в Реестре программ для ЭВМ; заяв. 12.02.2007;

№ 2007610466; опубл. 06.04.2007. РОСПАТЕНТ.

45. Св-во о гос. регистр. программы для ЭВМ № 2011611839 РФ. Программный комплекс «Комплекс математических моделей электрогенератора и электросети» // **Петроченков А. Б.** [и др.]; зарег. в Реестре программ для ЭВМ; заяв. 30.12.2010; № 2010618413; опубл. 28.02.2011. РОСПАТЕНТ.

46. Св-во о гос. регистр. базы данных № 2011620475 РФ. «База данных «Energy Data Ware» // **Петроченков А. Б.** [и др.]; зарег. в Реестре баз данных; заяв. 03.05.2011; № 2011620330; опубл. 28.06.2011. РОСПАТЕНТ.

47. Св-во о гос. регистр. базы данных № 2011620476 РФ. «База данных технического обслуживания и ремонта электродвигателей» // **Петроченков А. Б.** [и др.]; зарег. в Реестре баз данных; заяв. 03.05.2011; № 2011620331; опубл. 28.06.2011. РОСПАТЕНТ.

48. Св-во о гос. регистр. программы для ЭВМ № 2012610069 РФ. Программа «Forecast Models Analysis» // Казанцев В.П., **Петроченков А. Б.**, Хорошев Н.И.; зарег. в Реестре программ для ЭВМ; заяв. 20.10.2011; № 20116178800; опубл. 10.01.2012. РОСПАТЕНТ.

49. Св-во о гос. регистр. программы для ЭВМ №2012660288 РФ. Программа «ЭлектроДин» // **Петроченков А. Б.** [и др.]; зарег. в Реестре программ для ЭВМ; заяв. 21.09.2012; № 2012617929; опубл. 01.11.2012. РОСПАТЕНТ.

50. Св-во о гос. регистр. программы для ЭВМ № 2014661217 РФ. Программа «Моделирование динамики электрических систем произвольной конфигурации» («МДЭСПК») // Кавалеров Б.В., **Петроченков А. Б.** [и др.]; зарег. в Реестре программ для ЭВМ; заяв. 11.09.2014; № 2014619124; опубл. 27.10.2014. РОСПАТЕНТ.

Личный вклад автора в работы, опубликованные в соавторстве, состоит в том, что в работах [1, 2, 7, 8, 21, 27, 31, 33] автор обосновал структуру и алгоритмы информационно-программной среды для управления состоянием элементов ЭТК на различных этапах ЖЦ, совместимой с информационно-аналитическими системами производства; в работах [3, 5, 10, 11] автором сформулированы принципы организации экспертной оценки факторов риска отказов ЭО ПМСО; в работах [4, 38] автором предложен метод ГА для моделирования этапов ЖЦ ЭО; в работах [6, 15, 34, 36] автором предложены научно-технические решения и мероприятия, обеспечивающие повышение эффективности функционирования ЭТК ПМСО; в работах [9, 22] автором предложены методы оценки моделей отказов элементов ЭТК при комплексном анализе состояний ЭТК; в работах [14, 20] автором предложены методы исследования, принципы и способы повышения эффективности функционирования ЭТК ПМСО; в работах [16, 18, 25] автором предложена иерархическая структура системы мониторинга и технической диагностики элементов ЭТК, типизированных по классификационным признакам взаимодействия в энергоинформационной модели; в работах [19, 28] автором предложена модель интеллектуальной среды, осуществляющей поддержку функционирования элементов ЭТК; в работах [23, 26] автором предложены алгоритмы учета влияния коммутационных элементов на структуру системы ЭС предприятий.

В формулах патента [41] и свидетельств о регистрации баз данных и программ для ЭВМ [42-50] указан личный вклад автора, совпадающий с тематикой диссертационного исследования.