

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

ПЕТРОЧЕНКОВ Антон Борисович

**ТЕОРИЯ, МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ
ПРЕДПРИЯТИЙ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ ОТРАСЛИ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант – докт. техн. наук, профессор Ляхомский А. В.

Пермь-Москва – 2019

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В «Энергетической стратегии России на период до 2030 года» (с корректировкой до 2035 года) указано, что в минерально-сырьевой, электроэнергетической и смежных отраслях «накоплен немалый груз проблем и вызовов», среди которых отмечаются снижение надежности электроснабжения, обусловленное высоким износом основных производственных фондов»; «диспропорция между заявляемыми характеристиками электропотребления при технологическом присоединении и их последующими фактическими значениями»; «необходимость достижения эффективного сочетания централизованных ... систем с развитием распределенной генерации и интеллектуализацией энергетических систем». Для достижения стратегических целей развития электроэнергетики необходимо решить следующие основные задачи: расширенное внедрение управляемых электрических сетей нового поколения и других новых технологий для повышения эффективности отрасли; «...обеспечение живучести, режимной надежности, безопасности и управляемости электроэнергетических систем...». Отдельно подчеркивается необходимость развития малой распределенной энергетики в кластерных образованиях добывающих и перерабатывающих предприятий.

В «Ожидаемых результатах» энергетической стратегии России также указывается на необходимость создания и развития современной информационной среды взаимодействия между предприятиями; «целесообразно применение современных информационных технологий как инструмента организации и поддержки всех участников процесса создания, производства и использования оборудования и материалов для топливно-энергетического комплекса, позволяющих повысить эффективность их деятельности за счет ускорения процессов исследования и разработки, сокращения издержек в процессах производства и эксплуатации оборудования, а также повышения уровня его технического обслуживания».

Актуальность темы исследования обусловлена и тем, что вопросы оценки эффективности функционирования электротехнических комплексов (ЭТК) предприятий минерально-сырьевой отрасли (ПМСО) характеризуются как слабоструктурированные задачи с наличием количественно неизмеряемых компонент, для которых характерно отсутствие методов решения на основе непосредственного преобразования данных.

В настоящее время получение, преобразование, накопление, передача информации в электротехнических комплексах происходит на основе моделей, недостаточно адекватно отражающих режимы функционирования электротехнических комплексов в условиях неопределенности и неполноты информации.

Указанное обстоятельство касается оценок как электроэнергетических, так и управленческих аспектов. Вместе с этим, в условиях неопределенности и неполноты информации актуальным является вопрос выбора диагностируемых параметров для оценки технического состояния электротехнического оборудования (ЭО). Постоянное увеличение степени интеллектуализации ЭО, усложнение «мобильных» структур и топологии электроэнергетических систем (ЭЭС) ПМСО, внедрение современных систем мониторинга и технической диагностики (прежде всего, для активно-адаптивных систем класса *SmartGrid/MicroGrid*) требуют дальнейшего развития теории электротехнических комплексов и систем предприятий минерально-сырьевой отрасли в части: повышения научного уровня методологии исследования; оценки состояния, моделирования, прогнозирования и расчета режимов функционирования ЭТК.

Сложность процессов, влияние многих факторов, учет имеющихся многокомпонентных ресурсов и необходимость принятия обоснованных и оперативных решений в различные периоды жизненного цикла ЭТК ПМСО предполагают использование при проектировании и эксплуатации электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли методов системного анализа, моделирования, интегрированной логистической поддержки, вычислительного эксперимента. Совокупность указанных методов, поддерживаемых инструментальными вычислительными системами и применяемых с целью повышения качества управленческих решений при минимальных технико-экономических затратах, целесообразно использовать как основу методологии исследования режимов функционирования ЭТК ПМСО в условиях неопределенности и неполноты информации с применением энергоинформационных моделей.

Степень разработанности проблемы. 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, Г.И. Бабокина, В.Я. Беспалова, П.А. Бутырина, В.А. Веникова, С.И. Гамазина, К.С. Демирчяна, М.С. Ершова, В.И. Идельчика, Н.Ф. Ильинского, А.Л. Карякина, В.З. Ковалева, А.Е. Козярука, М.В. Костенко, Б.И. Кудрина, А.В. Ляхомского, С.И. Малафеева, Ю.К. Розанова, Ф.Н. Сарапулова, Ю.В. Шевырева, Ю.А. Шурыгина, *F. Kloeppel, A. Kwasinski, M. Paolone* и др.

Методологическая база системных исследований в электроэнергетике, соответствующих методов прогнозирования, проектирования, оценки состояния и развития электроэнергетических систем в нашей стране и за рубежом сформирована на основе трудов Д.А. Арзамасцева, В.А. Барина, Л.С. Беляева, И.М. Волькенау, А.З. Гамма, В.В. Ершевича, А.Н. Зейлингера, Н.И. Зеленохата, В.Г. Китушина, А.Б. Лоскутова, М.Ш. Мисриханова, М.Н. Розанова, Ю.Н. Руденко, С.А. Совалова, В.Д. Шлимовича, *A.Abur, A.G. Exposito* и др.

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.

Вместе с тем, 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 учета условий неопределенности и неполноты информации. 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 ЭЭС ПМСО.

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 принципов и спо-

совов повышения эффективности функционирования ЭТК предприятий минерально-сырьевой отрасли, представляется актуальной, а результаты работы могут быть квалифицированы как определенный вклад в развитие теории электротехнических комплексов и систем.

Связь темы диссертации с государственными научными программами. Работа выполнялась в соответствии с тематическими планами 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.), гранта РФФИ № 14-07-96000 (2014–2016 гг.).

Тематика диссертационных исследований соответствует тематике выполняемых в настоящее время работ по государственному заданию Минобрнауки РФ № 8.4157.2017/ПЧ (2017–2019 гг.).

Цель работы – теоретическое обобщение, совершенствование методов, разработка научно-технических решений и программных средств, обеспечивающих эффективность функционирования электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли.

Идея работы заключается в представлении электротехнического комплекса предприятия минерально-сырьевой отрасли в виде энергоинформационной модели объектно-ориентированной структуры, позволяющей за счет оперативности текущих и прогнозных оценок состояния электрооборудования, интеллектуализации поддержки принятия и реализации решений с учетом неопределенности и неполноты информации, повысить эффективность функционирования электротехнических комплексов.

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

1) исследование функционирования электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли с учетом как отраслевой специфики, так и топологии электроэнергетических систем (соответствует п.п.1, 4*);

2) модификация метода и алгоритмов моделирования режимов электроэнергетических систем предприятий минерально-сырьевой отрасли (соответствует п.1);

3) разработка энергоинформационной модели электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли, синтезированной на основе объектно-ориентированного подхода с использованием топологических матриц (соответствует п.п.1, 3);

4) разработка иерархической структуры и базы моделей элементов электротехнических комплексов, учитывающих методы и алгоритмы оперативного анализа режимов функционирования электротехнических комплексов и оценки технического состояния электротехнического оборудования предприятий минерально-сырьевой отрасли (соответствует п.п.1, 3);

5) разработка программно-аппаратных моделей, направленных на повышение эффективности функционирования ЭТК, на основе синтезированных баз данных и баз знаний, адаптивных к произвольным структурам электротехнических комплексов (соответствует п.3);

6) разработка научно-технических решений, мероприятий на основе алгоритмов повышения эффективности функционирования электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли, и рекомендаций по их применению (соответствует п.3).

* Паспорт специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

Область исследования, обозначенная в сформулированных задачах, соответствует п.1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем», п.3 «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления», п.4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях» паспорта научной специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы».

Объект исследования – электротехнические комплексы предприятий минерально-сырьевой отрасли.

Методология и методы исследования. Методология исследования при выполнении диссертационной работы обусловлена использованием для решения сформулированных задач методов теории моделирования, автоматического управления, вычислительной математики, матриц, графов, алгоритмизации, вероятностей, надежности, планирования эксперимента, оптимизации, ошибок, теории электрических цепей, электропривода. Проведены экспериментальные исследования функционирования элементов ЭТК с использованием технических средств контроля и управления технологическим оборудованием, а также с применением современной тепловизионной измерительной техники. Эксплуатационные ситуации с варьированием 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, и их новизна:

1) совокупность методов и методик исследования режимов функционирования электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли, отличающихся тем, что позволяют использовать не только электротехнические параметры, но и параметры оценки технического состояния электротехнических комплексов в условиях неопределенности и неполноты информации;

2) математическое описание электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли в виде энергоинформационной модели, отличающееся: принципом формирования моделей структурных элементов электротехнического комплекса на основе объектно-ориентированного подхода с использованием топологических матриц; формированием уравнений связи для моделирования взаимодействия структурных элементов электротехнических комплексов на основе матрицы состояния; модификацией и разработкой алгоритмов и методик расчета параметров структурных элементов электротехнических комплексов;

3) принципы и средства повышения эффективности функционирования электротехнических комплексов на основе энергоинформационной модели, отличающиеся тем, что обеспечивают эффективные оценки и прогноз состояния элементов электротехнических комплексов с адаптацией к изменению горно-геологических, климатометеорологических

ских, производственно-технологических и организационно-управленческих условий деятельности предприятий;

4) программно-аппаратные модели, имитирующие функционирование элементов электротехнических комплексов, отличающиеся тем, что построены на основе синтезированных баз данных и баз знаний, адаптивных к произвольным структурам электротехнических комплексов.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются:

– корректным использованием апробированного математического аппарата теории автоматического управления, моделирования, вычислительной математики, матриц, графов, алгоритмизации, вероятностей, 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 результатов 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 использованием в учебном процессе.

Значение полученных результатов работы:

для теории – в разработке совокупности методов и методик исследования режимов функционирования электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли, позволяющих выполнять комплексную оценку технического состояния и моделирование эффективности их функционирования в условиях неопределенности и неполноты информации; в модификации метода и алгоритмов моделирования режимов электроэнергетических систем предприятий минерально-сырьевой отрасли; в разработке энергоинформационной модели электротехнических комплексов, синтезированной на основе объектно-ориентированного подхода с использованием топологических матриц; в разработке иерархической структуры и базы моделей элементов электротехнических комплексов, учитывающих методы и алгоритмы оперативного анализа режимов функционирования электротехнических комплексов и оценки технического состояния электротехнического оборудования предприятий минерально-сырьевой отрасли; в разработке программно-аппаратных моделей электротехнических комплексов с целью их интеллектуализации, на основе синтезированных баз данных и баз знаний, адаптивных к произвольным структурам электроэнергетических систем.

Вышеизложенные результаты позволили развить теорию электротехнических комплексов и систем в части: совершенствования методов оценки состояний, моделирования режимов функционирования, методов, способов и средств повышения эффективности функционирования электротехнических комплексов;

– для практики – в разработке и внедрении научно-технических решений, обеспечивающих повышение эффективности функционирования электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли, включающих: моделирование режимов электроэнергетических систем произвольной структуры на основе уравнений узловых напряжений; систему информационной поддержки управления жизненным циклом электротехнического оборудования; технологическое картирование электротехнического оборудования предприятий минерально-сырьевой отрасли; программно-аппаратное моделирование объектов автономной энергетики для систем электроснабжения с комплексным (централизованным и автономным) энергоснабжением; управление эксплуатационной документацией для обеспечения эффективного функционирования электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли.

Практическая ценность научно-технических решений подтверждается патентами и свидетельствами о государственной регистрации программ и баз данных для ЭВМ.

Реализация результатов работы. Методология оценки состояний ЭТК использована и внедрена в методике оценки технического состояния 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», группы компаний «СПУТНИК». Технологические карты по техническому обслуживанию и ремонту (ТОиР) электротехнического оборудования, включающие модели технологических операций, используются для сервисного обслуживания ЭО региональных предприятий ПАО «ЛУКОЙЛ», ПАО «УРАЛКАЛИЙ», АО «СИБУР-ХИМПРОМ», ООО «Пермская электроремонтная компания». «Система информационной поддержки управления жизненным циклом электротехнического оборудования» внедрена на предприятии ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ».

Методики и программно-аппаратная реализация полунатурных испытаний элементов систем управления газотурбинных двигателей для промышленных газотурбинных электростанций внедрены на испытательных стендах испытательного полигона ПАО «Протон-Пермские моторы».

Результаты диссертационного исследования использованы при разработке и реализации схем и программ развития электроэнергетики Пермского края (2014–2024 г.г.).

Принципы и положения в области повышения эффективности использования оборудования по направлениям механики, энергетики и автоматизации вошли в основу стандарта ПАО «Татнефть».

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

Тематика диссертационных исследований соответствует тематике образовательного и исследовательского гранта 573879-EPP-1-2016-1-FR-EPPKA2-CBHE-JP европейской программы Erasmus+ (2016–2019 г.г.).

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы в

период с 2003 по 2019 г. докладывались и обсуждались на международных, всероссийских конгрессах, симпозиумах, конференциях и форумах, в том числе: «Энергетика, материальные и природные ресурсы. Эффективное использование. Собственные источники энергии» (г. Пермь, 2005–2007), «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments (NI Days)» (г. Москва, 2007, 2009, 2013–2016), «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук» (г. Москва, 2008), «Управление большими системами» (г. Ижевск, 2009, г. Пермь, 2010), «ICEEE-2010: 13th 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, 2010–2019), «Автоматизированный электропривод» (г. Иваново, 2012, г. Саранск, 2014, г. Пермь, 2016, г. Новочеркасск, 2018), «ICAИТ» (г. Кётен, Германия, 2013–2019), «Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий» (г. Уфа, 2013), «NI Week» (г. Остин, США, 2013, 2016), «Неделя горняка» (г. Москва, 2014–2019), «Xperience Efficiency» (г. Москва, 2014), XVIII–XXI международные конференции по мягким вычислениям и измерениям SCM’2015–2018 (г. Санкт-Петербург, 2015–2018), «Стратегическое партнерство вузов и предприятий высокотехнологичных отраслей» (г. Санкт-Петербург, 2015, 2017, 2018), «2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)» (г. Рига, Латвия); на секциях научно-технических советов, научно-технических семинарах и конференциях предприятий пермской группы нефтяной компании «ЛУКОЙЛ», ПАО «ГАЗПРОМ», филиала АО «МРСК Урала» – «Пермэнерго», АО «ОДК-Авиадвигатель», ПАО «Протон-Пермские моторы», АО «НПО «Энергомаш».

Разработки по тематике диссертационных 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, 2015), «Высокие технологии XXI века» (г. Москва, 2006, 2008), «Московский международный салон изобретений и инновационных технологий «Архимед» (2011–2016, 2019).

Публикации и патенты. Список научных трудов Петроченкова А.Б. содержит 45 печатных и электронных работ, в которых изложены основные результаты диссертационного исследования, в том числе 21 публикация в периодических изданиях из перечня ВАК РФ для докторских диссертаций по научной специальности 05.09.03 (из которых 18 проиндексированы в международной базе цитирования Scopus). По результатам диссертационного исследования зарегистрировано 17 объектов интеллектуальной собственности.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 340 источников (в том числе 75 зарубежных) и 7 приложений. Общий объем диссертации – 381 с., 85 рисунков, 14 таблиц, 45 с. приложения.

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.

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.

В общем виде структура современного электротехнического комплекса приведена на рисунке 1. Блок I на рисунке 1 представляет собой «классическую» структуру электротехнического комплекса. Для ЭТК предприятий минерально-сырьевой отрасли характерны, прежде всего, электрические и механические процессы. Блок II представляет собой «интеллектуальный» компонент электротехнического комплекса.

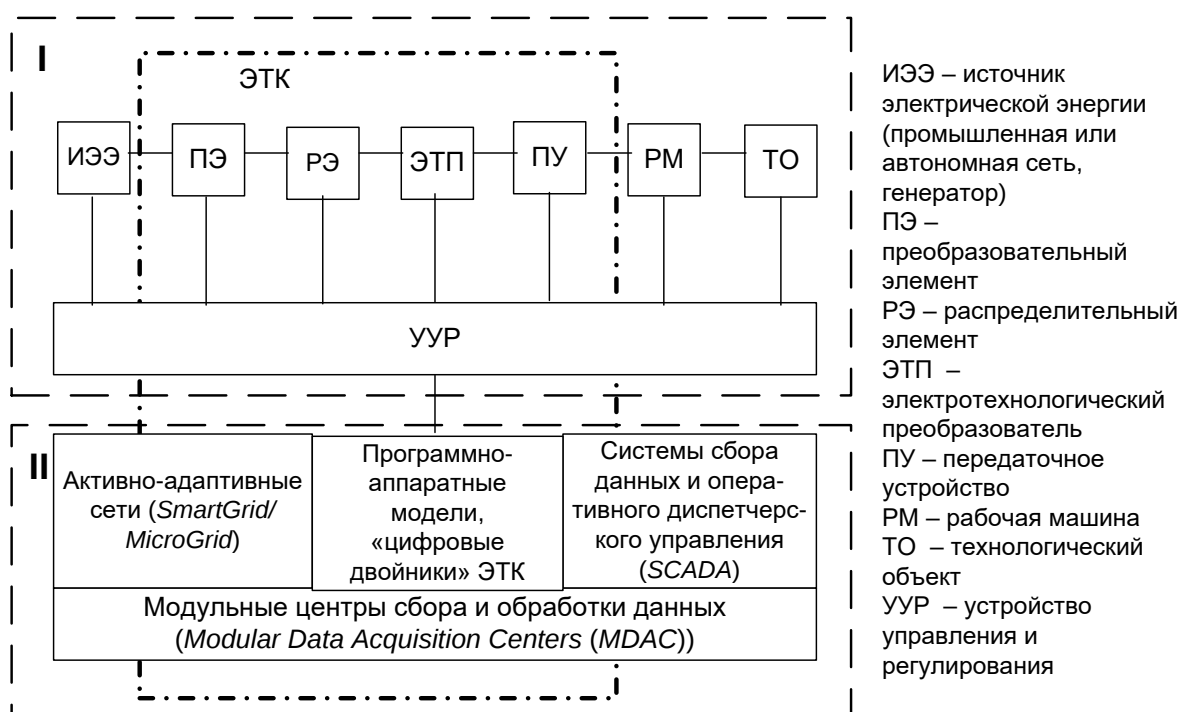


Рисунок 1 – Структура электротехнического комплекса

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 ЭЭС (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.

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, МЭК 61850) 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 REQ18/WEQ19, NEMA SGAMI 1, IETF RFC62721, SAE J1772TM, SAE J28361, NISTIR 7761L, SERA*)) показывает, что для обеспечения эффективного функционирования ЭТК ПМСО необходимо учитывать все этапы жизненного цикла электротехнического комплекса.

Разработанная структурно-функциональная схема управления жизненным циклом (ЖЦ) ЭТК ПМСО приведена на рисунке 2.

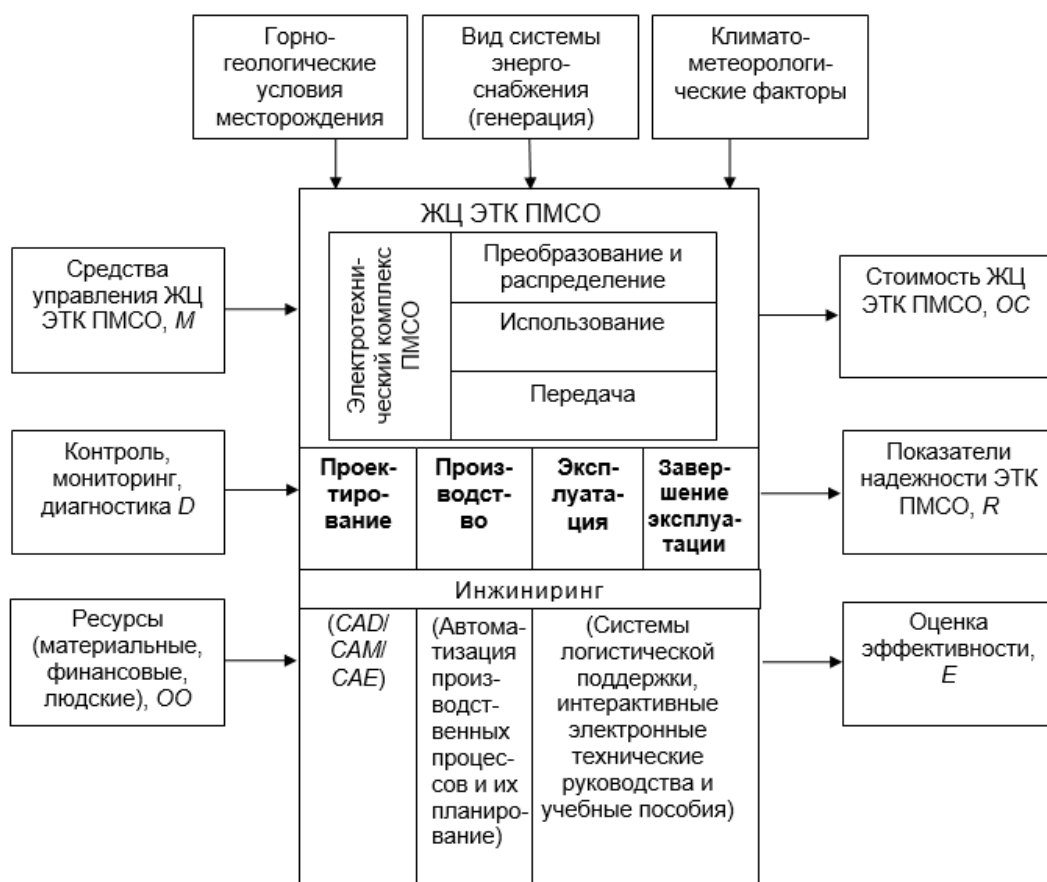


Рисунок 2 – Схема управления ЖЦ ЭТК ПМСО

Разработанные в диссертационном исследовании средства управления жизненным циклом электротехнических комплексов ПМСО, обеспечивающие повышение эффективности их функционирования, приведены на рисунке 3.

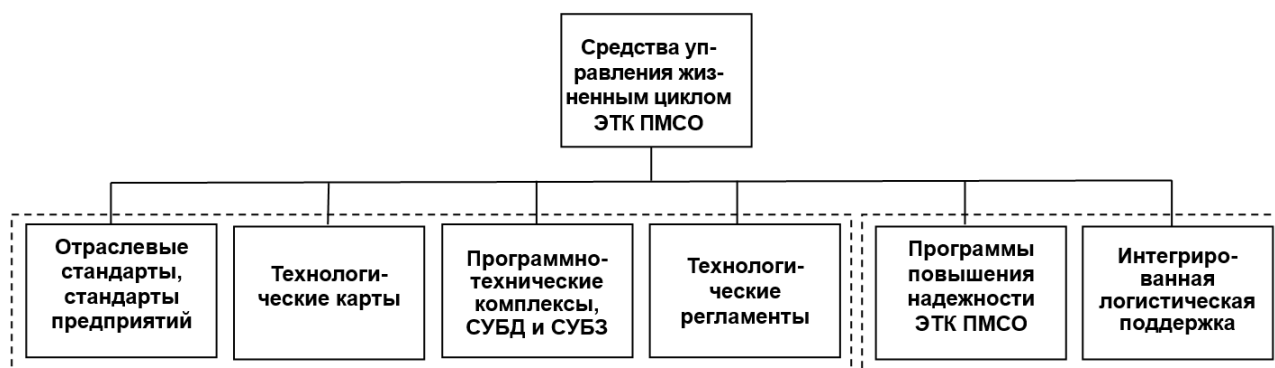


Рисунок 3 – Средства управления жизненным циклом ЭТК ПМСО (СУБД, СУБЗ – системы управления базами данных и базами знаний)

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 *Microsoft* «Эталонная архитектура интеллектуальных энергосетей»).

В работах профессора МЭИ 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 (ЭС) «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 ЭС, 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 жизненного цикла ЭТК ПМСО, требуется разработка принципиально новой 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.

Вторая глава посвящена моделированию 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 создания моделей отдельных элементов и создания модели их взаимодействия. В известных работах В.А. Веникова и О.А. Суханова, 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 электрических параметров режима (токов и напряжений). В результате анализа выбрана модель в виде комплексных уравнений узловых напряжений (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:

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

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 элемента; $\mathbf{A}_i$, $\mathbf{B}_i$ – 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 электротехнических комплексов ПМСО в системе координат (d, q) (при записи систем математических уравнений использованы общепринятые обозначения):

Синхронные генераторы:

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

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

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

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

$$\mathbf{B}_{\text{АД}} = \mathbf{A}_{\text{АД}} \times \begin{pmatrix} r_a & \omega x_1 - \omega_2 \frac{x_\mu^2}{x_2} & -r_2 \frac{x_\mu}{x_2} & (\omega - \omega_2)x_\mu \\ \omega_2 \frac{x_\mu^2}{x_2} - \omega x_1 & r_a & (\omega_2 - \omega)x_\mu & -r_2 \frac{x_\mu}{x_2} \end{pmatrix}, \omega_2 = \omega - \omega_{\text{АД}}, \mathbf{H}_{\text{АД}} = \mathbf{0}.$$

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

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

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

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

Для моделей энергетических установок, взаимодействующих с синхронными генераторами механически, приведение к форме (1) не требуется.

Сформировав из правых частей уравнения (1) вектор $\mathbf{W}$, $\mathbf{W} = \begin{pmatrix} -\mathbf{B}_1 \mathbf{I}_1 - \mathbf{H}_1 \\ -\mathbf{B}_2 \mathbf{I}_2 - \mathbf{H}_2 \\ \vdots \\ -\mathbf{B}_i \mathbf{I}_i - \mathbf{H}_i \end{pmatrix}$, урав-

нение связи для ЭЭС произвольной структуры можно представить в виде:

$$\mathbf{PAP}^T \mathbf{U} = \mathbf{PW} - \mathbf{PI}, \quad (2)$$

где $\mathbf{P}$ – клеточная матрица структуры (инцидентности), клетками матрицы являются нулевые матрицы или матрицы преобразований,

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

δ_{ij} – угол между координатами, в которых моделируется структурный элемент; $\mathbf{A}$ – блочная квазидиагональная матрица проводимостей ветвей ЭЭС,

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

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

$$\mathbf{PAP}^T \mathbf{U} = \mathbf{PW}. \quad (2')$$

Выполнена модификация метода моделирования стационарных (квазистационарных) режимов электроэнергетических систем на основе УУН, состоящий из следующих вычислительных процедур:

- 1) формирование расчетной схемы ЭЭС. Формирование матрицы $\mathbf{\Pi}$;
- 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_6, B . Расчет коэффициентов приведения каждого элемента ЭТК к базисному уровню: $k_{\text{пр}i} = U_6 / U_{ni}$, где U_{ni} – номинальное напряжение i -го элемента, для двухобмоточных трансформаторов $U_n = U_{\text{нн}}$, для источников электроэнергии $U_n = E_n$;

$$4) \text{ формирование вектора-столбца } \mathbf{\dot{H}}: [\mathbf{\dot{H}}_i] = \begin{cases} \mathbf{\dot{E}}_i, & i \in EES, \\ \mathbf{\dot{E}}_{qi}, & i \in SM, \\ \mathbf{0}, & i \in L, i \notin SM, \end{cases}$$

где EES – множество ИЭЭ; SM – подмножество СД; L – множество потребителей нагрузки; $\mathbf{\dot{E}}_i$ – приведенная к базисной ступени матрица ЭДС i -го ИЭЭ, $\mathbf{\dot{E}}_i = k_{\text{пр}i} \cdot \mathbf{E}_i$; $\mathbf{\dot{E}}_{qi}$ – приведенная к базисной ступени матрица ЭДС i -го СД по поперечной оси, $\mathbf{\dot{E}}_{qi} = U_6 \cdot \mathbf{E}_{qi} = U_6 \cdot (0 \ e_{qi})^T$; e_{qi} – номинальная синхронная ЭДС i -го СД, $o. e.$

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

где AM – подмножество АД; $\mathbf{\dot{E}}_i''$ – приведенная к базисной ступени матрица сверхпереходной ЭДС i -го СД или АД, $\mathbf{\dot{E}}_i'' = U_6 \cdot \mathbf{E}_i'' = U_6 \cdot (0 \ e_i'')^T$; e_i'' – сверхпереходная ЭДС i -го СД или АД, $o. e.$);

- 5) формирование блочной квазидиагональной матрицы проводимостей $\mathbf{\dot{A}}$:

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

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

$$6) \text{ формирование УУН: } \mathbf{\dot{U}} = - \left(\mathbf{\Pi} \cdot \mathbf{\dot{A}} \cdot \mathbf{\Pi}^T \right)^{-1} \cdot \mathbf{\Pi} \cdot \mathbf{\dot{A}} \cdot \mathbf{\dot{H}};$$

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

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

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

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

расчет действующих значений тока и напряжений: $U_i = \sqrt{U_{id}^2 + U_{iq}^2}, I_i = \sqrt{I_{id}^2 + I_{iq}^2}.$

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.

Расчет стационарных (квазистационарных) режимов ЭЭС положен в основу моделирования 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 третьей главе представлена реализация энергоинформационной модели ЭТК ПМСО. Предлагается перейти от «классического» функционала уравнений (2) к функционалу, содержащему большую информацию о техническом состоянии (ТС) элементов ЭТК (при этом под информацией понимается не только численные значения переменных, но и функционал системы информационной поддержки управления ЖЦ элементов ЭТК).

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).

Таким образом, энергоинформационную модель ЭТК можно представить в виде:

$$\hat{\mathbf{P}}\mathbf{S}\hat{\mathbf{P}}^T\hat{\mathbf{U}} = \hat{\mathbf{P}}\hat{\mathbf{W}} - \hat{\mathbf{P}}\hat{\mathbf{I}}, \quad (4)$$

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

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

$\mathbf{A}$ – блочная квазидиагональная матрица проводимостей ветвей;

$\mathbf{M}$ – блочная квазидиагональная матрица средств управления ЖЦ ЭТК,

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \mathbf{M}_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mathbf{M}_{22} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \mathbf{M}_{nn} \end{pmatrix}; \quad (5)$$

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

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} \mathbf{X}_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mathbf{X}_{22} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \mathbf{X}_{nn} \end{pmatrix}; \quad (6)$$

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

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} \mathbf{P}_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mathbf{P}_{22} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \mathbf{P}_{nn} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

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

- 1) расчет электрических режимов ЭЭС предприятия:

$$\mathbf{R}_1 \mathbf{C} = \mathbf{A}. \quad (8)$$

Данному оператору $\mathbf{R}_1$ отвечает матрица проводимостей ветвей $\mathbf{A} = \bigoplus_{i=1}^n \mathbf{A}_{ii}$. Урав-

нение (4) в этом случае трансформируется в уравнение (2). Этот режим является основным в энергоинформационной модели ЭТК ПМСО;

- 2) выбор средств управления жизненным циклом элементов ЭТК ПМСО:

$$\mathbf{R}_2 \mathbf{C} = \mathbf{M}, \quad \mathbf{M} = \bigoplus_{i=1}^n \mathbf{M}_{ii}, \quad (9)$$

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

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

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

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

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

$$\mathbf{K}_{kk} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & \dots & \dots & 1 & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & 1 & & & \vdots & & & \\ \vdots & & \ddots & & \vdots & & & \\ \vdots & & & 1 & \vdots & & & \\ 1 & \dots & \dots & \dots & 0 & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & & & & \vdots & 1 & & \\ \vdots & & & & \vdots & & \ddots & \\ \vdots & & & & \vdots & & & 1 \end{bmatrix} - j\text{-я строка, } j\text{-й столбец}$$

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

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:

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

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

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

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

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

3) анализ основных диагностируемых параметров элементов ЭТК ПМСО:

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

4) выбор модели развития повреждения (прогнозной модели) для элемента ЭТК в определенный момент времени:

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

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

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.

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

№	Тип элемента ЭТК ПМСО	Электро-энергетический 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, ГПА, 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 <i>SmartGrid/MicroGrid (Smart Metering</i> (интеллектуальные счетчики), <i>Dynamic Grid Management</i> (динамическое управление миниэлектроэнергетическими системами), <i>Demand Response</i> (регулирование спроса))	+	-	-	+
10	Элементы SCADA-систем, телеметрия	-	-	-	+
11	Элементы MDAC, системы мониторинга и технической диагностики	-	-	-	+

Структурную схему энергоинформационной модели электротехнического комплекса можно представить в виде следующих блоков (рисунок 4):

(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 противоаварийной автоматики;

(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.

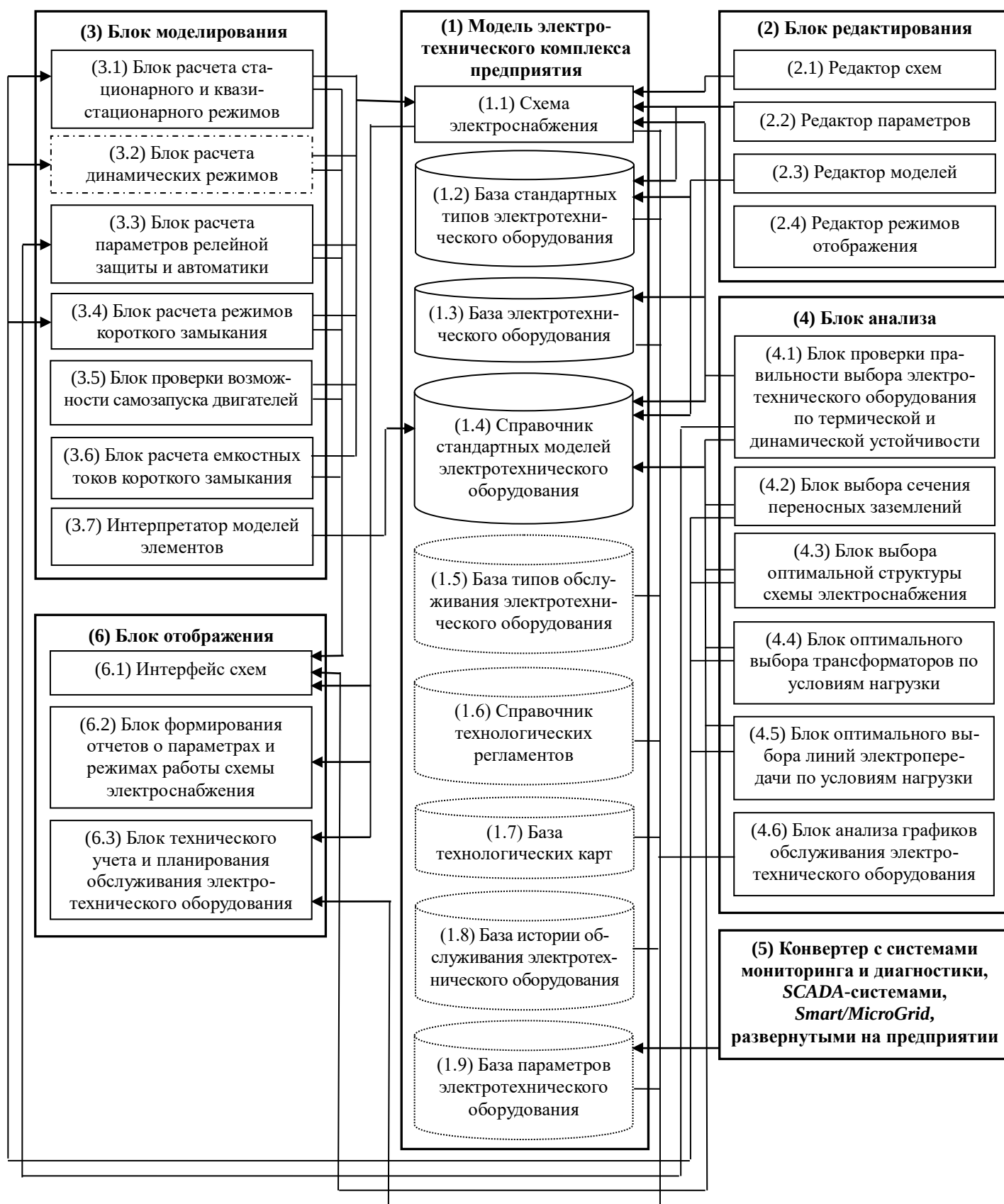


Рисунок 4 – Структурная схема энергoinформационной модели электротехнического комплекса

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 электроснабжения.

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

Поля класса вида обслуживания сформированы, исходя из следующих принципов:

- комплекс типов действий в составе вида обслуживания упорядочен в соответствии с классами составляющих его типов обслуживания и их показателями выполнения;
- периодичность выполнения каждого вида обслуживания может быть обусловлена фиксированным межремонтным периодом и (или) зависимостью от другого вида обслуживания;
- при возникновении необходимости внепланового ремонта дата следующего обслуживания может быть изменена.

Структура класса вида обслуживания представлена на рисунке 6.

Для обеспечения вопросов замены, технического обслуживания и ремонта (впоследствии прогнозирования технического состояния элементов ЭТК) разработана методика моделирования технологических операций ТОиР различных типов электротехнического оборудования

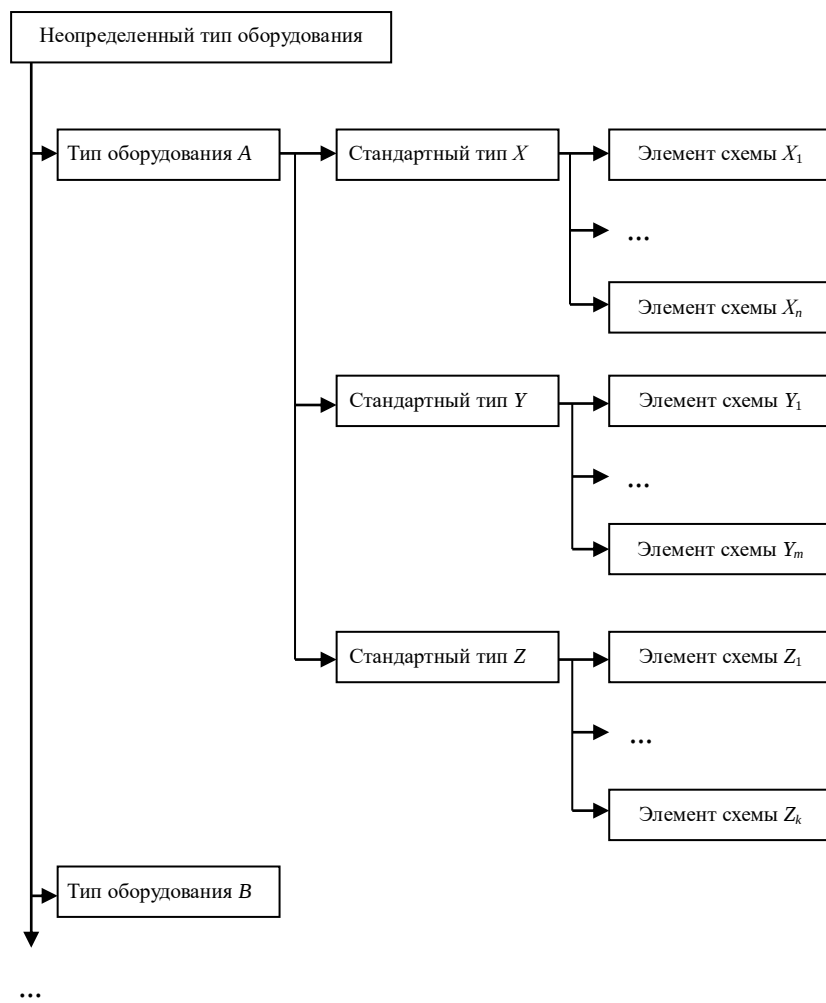


Рисунок 5 – Модель иерархии элементов ЭТК

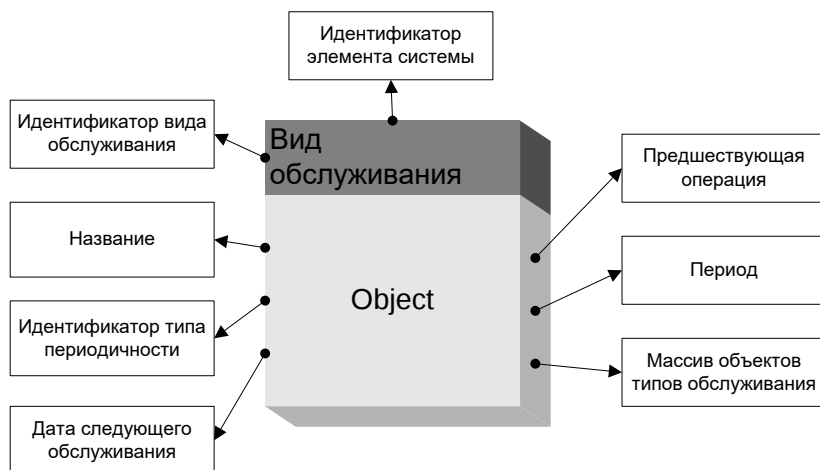


Рисунок 6 – Класс вида обслуживания

ПМСО (блок-схема моделирования технологических операций ТОиР ЭО представлена на рисунке 7).

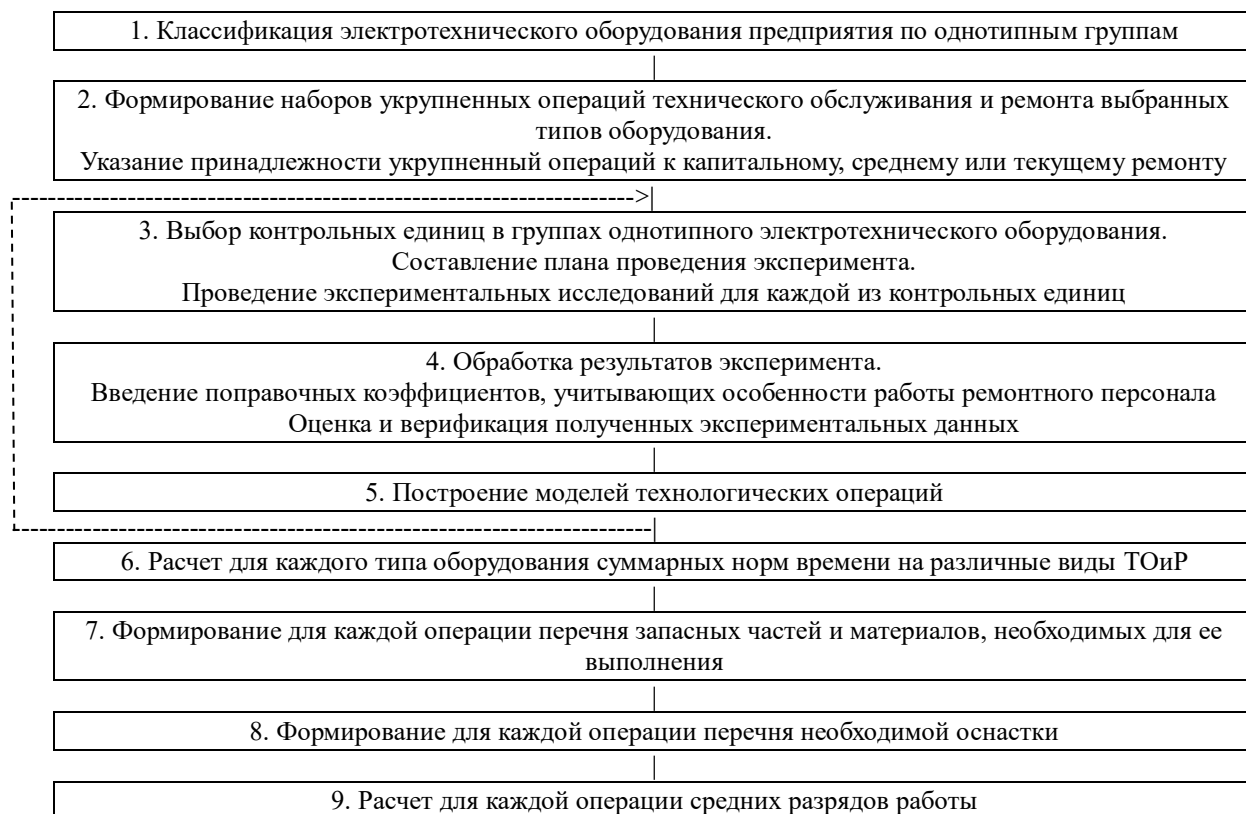


Рисунок 7 – Блок-схема моделирования технологических операций технического обслуживания и ремонта электротехнического оборудования

В четвертой главе разработаны принципы и способы обеспечения эффективности функционирования электротехнических комплексов, позволяющие на основе энергоинформационной модели учитывать временной и факторный аспекты горно-геологических, климатометеорологических, производственно-технологических и организационно-управленческих условий деятельности ПМСО.

Разработана методика комплексной оценки технического состояния электротехнического оборудования предприятий минерально-сырьевой отрасли на основе оценки технического состояния по непрерывно контролируемым технологическим параметрам, характеризующим техническое состояние элементов оборудования, и экспертной оценки состояния ЭО (рисунок 8).

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



Рисунок 8 – Блок-схема комплексной оценки технического состояния электротехнического оборудования

Для определения базовых вариантов (эвристик) проведения обслуживания электротехнического оборудования выделяются следующие мероприятия:

$D = \{d_1, d_2, d_3\}$ – мероприятия по получению информации, d_1 – контроль в аварийных ситуациях, d_2 – мониторинг и визуальный осмотр, d_3 – диагностика с применением специальных приборов инфракрасного и ультрафиолетового контроля;

$M = \{m_1, m_2, m_3\}$ – средства управления в соответствии с выражениями (11)–(13).

$S = \{s_1, s_2, s_3\}$ – профилактические и ремонтные мероприятия, s_1 – обслуживание ЭО по факту выхода ЭО из строя, s_2 – обслуживание ЭО на основе графика ППР, s_3 – обслуживание ЭО в рамках системы обеспечения по техническому состоянию.

В результате получены следующие базовые варианты проведения обслуживания ЭО:

$$H_1 = \{d_1 m_1 s_1\}, \quad (16)$$

$$H_2 = \{d_2 m_2 s_2\}, \quad (17)$$

$$H_3 = \{d_3 m_3 s_3\}. \quad (18)$$

Разработаны и программно реализованы алгоритмы обеспечения эффективного функционирования электротехнического оборудования для различных вариантов проведения обслуживания ЭО.

Метод интегрированной логистической поддержки жизненного цикла ЭТК предусматривает, что ЭО, входящее в состав ЭТК, необходимо рассматривать не только с позиций его эксплуатации, но и с учетом его проектирования, изготовления и испытания. Использование энергоинформационной модели ЭТК обеспечивает единое информационное пространство в задачах комплексного контроля и сопровождения ЭТК на этапах его ЖЦ.

Разработана структура системы информационной поддержки управления (СИПУ) ЖЦ ЭО, ориентированной на решение следующего класса задач: а) организационных, б) конструктивных (рациональный выбор совокупности контрольных параметров, автоматизация контроля и индикация неисправностей, возможность онлайн-анализа ТС ЭО), в) эксплуатационных (повышение квалификации обслуживающего персонала, обоснование объема и сроков проведения ТОиР, профилактических работ).

Пятая глава посвящена разработке программно-технического обеспечения как компонента энергоинформационной модели ЭТК.

Использование подхода *Hardware-In-the Loop* (HIL – программно-аппаратного моделирования или полунатурного моделирования) обеспечивает разработку и испытание сложных встроенных систем реального времени: математическая модель объекта управления работает в реальном времени, а испытываемый блок управления подключается к аппаратному модулю и управляет моделью объекта.

Во многих случаях реальные испытания стоят дороже высококачественного воспроизведения процесса в режиме реального времени. Программно-аппаратная модель включает в себя электрически эмулируемые датчики и приводы, которые выступают в качестве интерфейса между инструментом моделирования и встроенной тестируемой системой (рисунок 9). Таким образом, более экономично для разработки и тестирования подключение к программно-аппаратному симулятору – так называемому «цифровому двойнику», чем реальные испытания процесса.

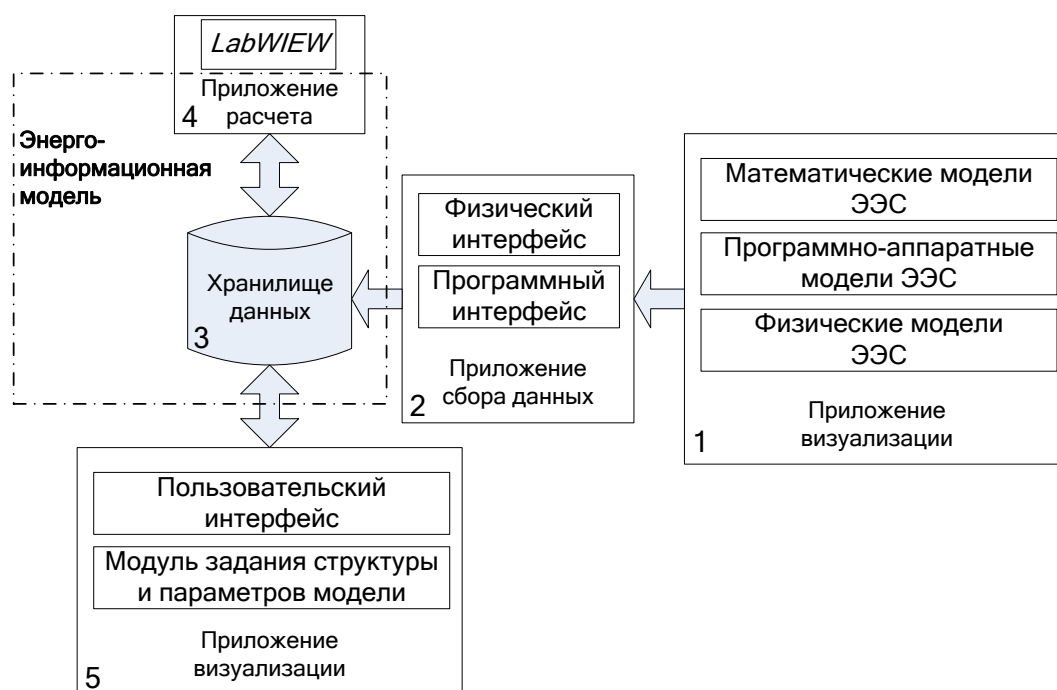


Рисунок 9 – Программные модули компьютерного комплекса испытаний газотурбинных установок

(1 – аппаратная часть; 2 – приложение сбора данных; 3 – хранилище данных; 4 – приложение расчета; 5 – приложение визуализации)

Функциональность виртуальных приборов, на основе которых строятся информационно-измерительные системы на платформе *LabVIEW*, позволяет обеспечить интеграцию элементов энергоинформационной модели ЭТК, систем мониторинга и диагностики и систем управления технологическими процессами, развернутых на промышленных предприятиях.

Разработано программно-техническое обеспечение для испытаний объектов автономной энергетики с учетом специфики работы ЭЭС предприятий минерально-сырьевой отрасли.

Произведена модификация (адаптация) математических моделей элементов автономных энергетических установок в формате единой энергоинформационной модели всего ЭТК предприятия. Пример экранной формы виртуального прибора симулятора ГТУ приведен на рисунке 10.

Разработанные программно-аппаратные модули являются расширяемыми и «гибкими» за счет использования шаблонов (паттернов) проектирования.

При таком подходе обеспечивается поддержка многоуровневости испытательных комплексов. Задачи непосредственного сбора информации и управления объектом решаются на уровне датчиков и исполнительных механизмов, так называемом объектом (полевом) или нижнем уровне. Задачи первичной обработки информации – на уровне контроллерного управления или среднем уровне иерархии. Задачи распределения информации, вторичной обработки и селективного представления результатов различным пользователям системы – на верхнем информационном уровне иерархии.

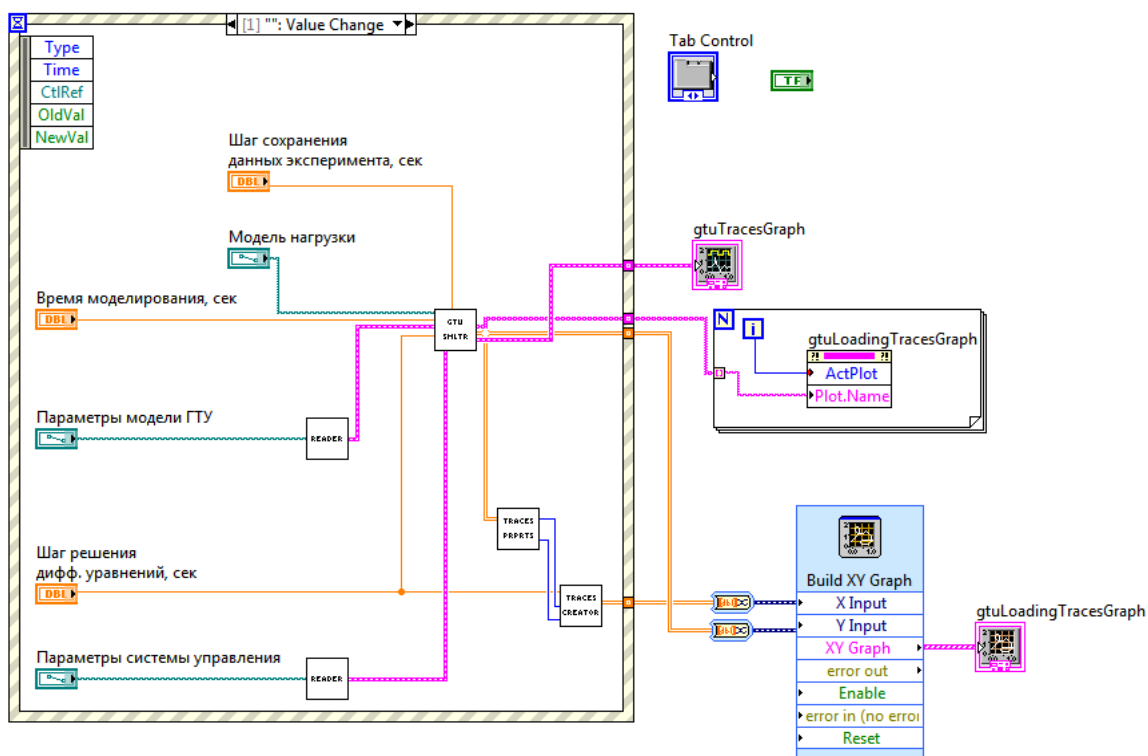


Рисунок 10 – Виртуальный прибор симулятора ГТУ в среде LABView

В шестой главе изложена реализация научно-технических решений для обеспечения повышения эффективности функционирования электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли.

Моделирование режимов электроэнергетических систем произвольной структуры на основе уравнений узловых напряжений.

Разработанный в главе 2 модифицированный метод моделирования режимов электроэнергетических систем на основе уравнений узловых напряжений и созданные на его основе программные комплексы приняты к реализации в ряде региональных организаций (ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ», Пермское региональное управление ООО «ЛУКОЙЛ-ЭНЕРГОСЕТИ», группа компаний «СПУТНИК», Министерство тарифного регулирования и энергетики Пермского края). Указанные комплексы обеспечивают:

- расчет параметров электроэнергетической системы произвольной топологии при номинальном и нештатных режимах с учетом результатов энергоинформационного моделирования с погрешностью, не превышающей 3–5 %.
- верификацию эффективного использования электротехнического оборудования с учетом жизненного цикла ЭО (как в подзадачах автоматической проверки правильности использования выбранного ЭО на электродинамическую и термическую стойкость, расчета уставок релейной защиты и противоаварийной автоматики, так и в подзадачах обеспечения информационной поддержки баз данных об истории обслуживания ЭО, автоматического составления графиков ППР, и др.).

Технологическое картирование электротехнического оборудования предприятий минерально-сырьевой отрасли.

Для обеспечения вопросов эффективной замены, технического обслуживания, ремонта и прогнозирования технического состояния элементов ЭТК проведено технологическое картирование различных типов электротехнического оборудования ПМСО на ос-

нове разработанных в главе 3 моделей технологических операций при ТОиР. Полученные технологические карты внедрены на региональных предприятиях ПАО «ЛУКОЙЛ», ПАО «УРАЛКАЛИЙ», АО «СИБУР-ХИМПРОМ», ООО «Пермская электроремонтная компания».

Система информационной поддержки управления жизненным циклом электротехнического оборудования.

Изложенные в главе 3 принципы построения энергоинформационной модели, 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, положены в основу разработанной и внедренной на предприятии ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» системы информационной поддержки управления жизненным циклом (СИПУ ЖЦ) электротехнического оборудования.

Разработанная система 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 11.

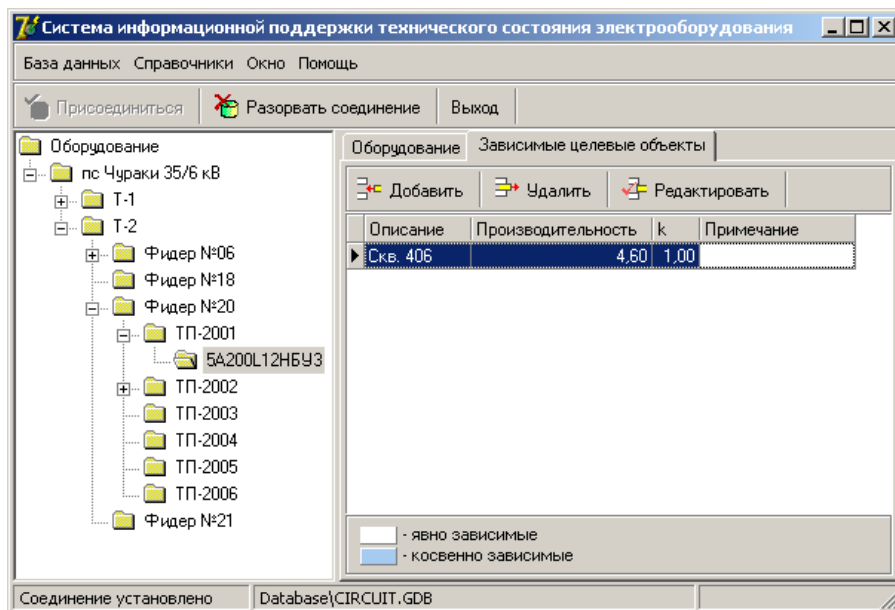


Рисунок 11 – Главное окно СИПУ ЖЦ ЭО ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ»

Управление эксплуатационной документацией для обеспечения эффективного функционирования электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли.

Изложенные в главе 5 принципы интегрированной логистической поддержки положены в основу разработанных руководящих документов, принятых к применению на отраслевых предприятиях:

- Стандарт ПАО «Татнефть» СТО ТН 433-2019;
- Интерактивные электронные технические руководства по интегрированной логистической поддержке электротехнического оборудования (Пермское региональное управление ООО «ЛУКОЙЛ-Энергосети», группа компаний «СПУТНИК»).

Для задач обучения разработано междисциплинарное электронное учебное пособие.

Программно-аппаратное моделирование объектов автономной энергетики для систем электроснабжения с комплексным энергоснабжением.

На основе представленных в главе 5 принципов разработки модулей программно-аппаратного моделирования разработан программный модуль имитационного моделирования энергетических установок в составе ЭЭС произвольной конфигурации для испытательных стендов испытательного полигона ПАО «Протон-Пермские моторы».

Оператор программного модуля имеет возможность получать, обрабатывать и хранить экспериментальные и модельные данные параметров энергетических установок (потребляемая мощность, угол поворота дозатора газа, частота вращения ротора свободной турбины) в различных режимах. На рисунке 12 показано окно оператора с зависимостью активной мощности от времени переходного процесса, полученной при моделировании наброса нагрузки газоперекачивающего агрегата (ГПА).

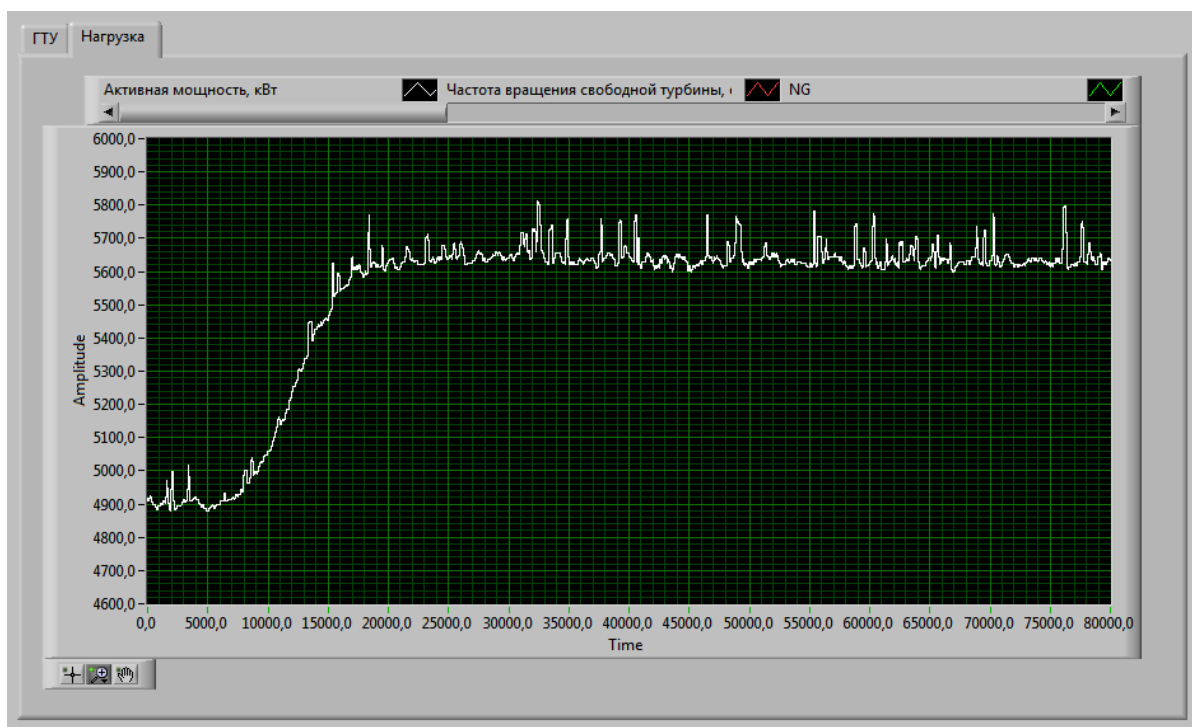


Рисунок 12 – Окно оператора модуля имитационного моделирования энергетических установок в составе электроэнергетической системы

По результатам расчета значений коэффициента несовпадения Тейла для основных сравниваемых параметров можно сделать вывод об адекватности построенных математических моделей энергетических установок – большинство значений коэффициента несовпадения Тейла не превышают 2–3 %, что подтверждает хорошую сходимость.

Данные об испытаниях энергетических установок хранятся в производственной системе испытательного полигона ПАО «Протон-Пермские моторы» и доступны как предприятиям-изготовителям энергетических установок, так и предприятиям-заказчикам, обеспечивая, тем самым, интегрированную логистическую поддержку энергетических установок на всех этапах их жизненного цикла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получено решение актуальной научной проблемы повышения эффективности функционирования электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли, представляющее собой развитие теории электротехнических комплексов и систем, заключающееся в совершенствовании методов оценки состояний, моделирования режимов функционирования, методов, способов и средств повышения эффективности функционирования электротехнических комплексов, имеющее важное хозяйственное значение.

Основные научные выводы и результаты, полученные лично автором:

1. Выполнено исследование функционирования электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли с учетом как отраслевой специфики, так и топологии электроэнергетических систем;
2. Выполнена модификация метода и алгоритмов моделирования режимов электроэнергетических систем предприятий минерально-сырьевой отрасли;
3. Разработана энергоинформационная модель электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли, синтезированная на основе матрично-топологического подхода;
4. Разработаны иерархическая структура и база моделей элементов электротехнических комплексов, учитывающие методы и алгоритмы оперативного анализа режимов функционирования электротехнических комплексов и оценки технического состояния электротехнического оборудования предприятий минерально-сырьевой отрасли;
5. Разработаны программно-аппаратные модели, имитирующие функционирование элементов электротехнических комплексов, на основе синтезированных баз данных и баз знаний, адаптивных к произвольным структурам электротехнических комплексов;
6. Разработаны научно-технические решения, мероприятия на основе алгоритмов повышения эффективности функционирования электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли, и рекомендации по их применению.
7. Разработаны и внедрены учебные пособия и интерактивные электронные образовательные ресурсы в учебный процесс ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», а также технические руководства для повышения квалификации специалистов отраслевых предприятий.
8. Проведена апробация 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.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

в изданиях из перечня ВАК РФ:

1. Винокур, В.М. Программный комплекс для математического моделирования автономных мини-электростанций / В.М. Винокур, Б.В. Кавалеров, А.Б. Петроченков // Электричество. – 2007. – № 3. – С.2–7.
2. Кавалеров, Б.В. Математическое моделирование газотурбинных мини-электростанций и мини-энергосистем / Б.В. Кавалеров, А.Б. Петроченков // ЭЛЕКТРО. –

2010. – № 6. – С.19–23.

3. Шигапов, А.А. Структурная схема математической модели системы электроснабжения для испытания алгоритмов управления / А.А. Шигапов, А.Б. Петроченков, Б.В. Кавалеров // *Электротехника*. – 2010. – № 6. – С.55–60. (Shigapov, A.A. Block diagram of mathematical model of power-supply system for testing control algorithms / A.A. Shigapov, A.B. Petrochenkov, B.V. Kavalerov // *Russian Electrical Engineering*. – 2010. – Vol.81. – No.6. – P.328–333. DOI: 10.3103/S1068371210060106.)

4. Кавалеров, Б.В. Моделирование электрической нагрузки для настройки систем управления конвертированными газотурбинными установками / Б.В. Кавалеров, А.Б. Петроченков // *Электротехника*. – 2011. – № 11. – С.11–16. (Kavalerov, B.V. Simulating electric load to adjust systems of control of converter gas-turbine plants / B.V. Kavalerov, A.B. Petrochenkov // *Russian Electrical Engineering*. – 2011. – Vol. 82. – No.11. – P.582–587. DOI: 10.3103/S1068371211110034)

5. Планирование процесса эксплуатации электротехнического оборудования с использованием теории марковских процессов / А.Б. Петроченков, С.В. Бочкарев, А.В. Ромодин, Д.К. Елтышев // *Электротехника*. – 2011. – № 11. – С.20–24. (The planning operation process of electrotechnical equipment using the Markov process / A.B. Petrochenkov, S.V. Bochkarev, A.V. Romodin, D.K. Eltyshev // *Russian Electrical Engineering*. – 2011. – Vol.82. – No.11. – P.592–595. DOI: 10.3103/S1068371211110113.)

6. Некоторые аспекты технологии эксплуатации электротехнических объектов на основе методов краткосрочного прогнозирования технического состояния / В.П. Казанцев, А.Б. Петроченков, А.В. Ромодин, Н.И. Хорошев // *Электротехника*. – 2011. – № 11. – С.28–34. (Some aspects of technology of use of electrical objects on the basis of methods of short term forecasting of technical condition / V.P. Kazantsev, A.B. Petrochenkov, A.V. Romodin, N.I. Khoroshev // *Russian Electrical Engineering*. – 2011. – Vol.82. – No.11. – P.600–606. DOI: 10.3103/S1068371211110058.)

7. Петроченков, А.Б. Об управлении жизненным циклом электротехнических комплексов в нефтедобыче / А.Б. Петроченков // *Электротехника*. – 2012. – № 11. – С.40а–48. (Petrochenkov, A.B. Regarding life-cycle management of electrotechnical complexes in oil production / A.B. Petrochenkov // *Russian Electrical Engineering*. – 2012. – Vol.83. – No.11. – P.621–627. DOI: 10.3103/S1068371212110090.)

8. Моделирование взаимодействия структурных элементов электроэнергетических систем / Б.В. Кавалеров, А.Б. Петроченков, К.А. Один, В.А. Тарасов // *Электротехника*. – 2013. – № 1. – С.11–15. (Modeling of the interaction of structural elements of electric-power systems / B.V. Kavalerov, A.B. Petrochenkov, K.A. Odin, V.A. Tarasov // *Russian Electrical Engineering*. – 2013. – Vol.84. – No.1. – P. 9–13. DOI: 10.3103/S1068371213010033.)

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

10. Петроченков, А.Б. К задаче формирования моделей технологических операций при ремонте элементов электротехнических комплексов / А.Б. Петроченков // *Электротехника*. – 2013. – № 11. – С.20–22. (Petrochenkov, A. B. On the problem of development of models of processing operations performed during repair of electrical engineering complex components / A.B. Petrochenkov // *Russian Electrical Engineering*. – 2013. – Vol.84. – No.11. – P.613–616. DOI: 10.3103/S1068371213110096.)

11. Полунатурное моделирование активно-адаптивной электрической сети /

А.Б. Петроченков, Т. Франк, А.В. Ромодин, А.В. Кычкин // Электротехника. – 2013. – № 11. – С.60–63. (Hardware in the Loop simulation of an active adaptive power grid / A.B. Petrochenkov, T. Frank, A.V. Romodin, A.V. Kychkin // Russian Electrical Engineering. – 2013. – Vol.84. – No.11. – P.652–658. DOI: 10.3103/S1068371213110102.)

12. Тарасов, В.А. Проблема коммутационных элементов в компьютерном моделировании систем электроснабжения / А.В. Тарасов, А.Б. Петроченков, Б.В. Кавалеров // Электротехника. – 2014. – № 11. – С.8–10. (Tarasov, V. A. The problem of switching elements in computer modeling of power systems / V. A. Tarasov, A.B. Petrochenkov, B.V. Kavalero / Russian Electrical Engineering. – 2014. – Vol.85. – No.11. – P.654–656. DOI: 10.3103/S1068371214110103.)

13. Петроченков, А.Б. Энергоинформационная модель электротехнических комплексов промышленных предприятий / А.Б. Петроченков // Электротехника. – 2014. – № 11. – С.47–51. (Petrochenkov, A. B. An energy-information model of industrial electrotechnical complexes / A.B. Petrochenkov // Russian Electrical Engineering. – 2014. – Vol.85. – No.11. – P.692–696. DOI: 10.3103/S106837121411010.)

14. Построение онтологической модели жизненного цикла электротехнического оборудования / А.Б. Петроченков, С.В. Бочкарев, М.В. Овсянников, С.А. Буханов // Электротехника. – 2015. – № 6. – С.19–25. (Construction of an ontological model of the life cycle of electrotechnical equipment / A.B. Petrochenkov, S.V. Bochkarev, M.V. Ovsyannikov, S.A. Bukhanov // Russian Electrical Engineering. – 2015. – Vol.86. – No.6. – P.320–325. DOI: 10.3103/S1068371215060115.)

15. Методика создания программных комплексов для математического моделирования электроэнергетических систем / Б.В. Кавалеров, А.Б. Петроченков, К.А. Один, В.А. Тарасов // Электротехника. – 2015. – № 6. – С.32–39. (A method for development of software packages for mathematical simulation of electric power systems / B.V. Kavalero / Russian Electrical Engineering. – 2015. – Vol.86. – No.6. – P.331–338. DOI: 10.3103/S1068371215060085.)

16. Петроченков, А.Б. Функции эффективности для основного электротехнического оборудования предприятий минерально-сырьевой отрасли / А.Б. Петроченков // Электротехника. – 2015. – № 11. – С.15–20. (Petrochenkov, A.B. Performance functions for basic electrical equipment of the mineral resources industry / A.B. Petrochenkov // Russian Electrical Engineering. – 2015. – Vol.86. – No.11. – P.634–639. DOI: 10.3103/S1068371215110103.)

17. Тарасов, В.А. Применение топологического списка для расчета параметров электроэнергетических систем на основе метода узловых напряжений / А.В. Тарасов, А.Г. Лейсле, А.Б. Петроченков // Электротехника. – 2016. – № 11. – С.40–44. (Tarasov, V.A. The use of a topological list for calculating the parameters of electric-power systems on the basis of the node-voltage method / V.A. Tarasov, A.G. Leisle, A.B. Petrochenkov // Russian Electrical Engineering. – 2016. – Vol.87. – No.11. – P.615–619. DOI:10.3103/S1068371216110110.)

18. Тарасов, В.А. О расчете коэффициента трансформации при компьютерном моделировании электроэнергетических систем произвольной конфигурации / А.В. Тарасов, А.Г. Лейсле, А.Б. Петроченков // Электротехника. – 2017. – № 11. – С.37–42. (Tarasov, V.A. On computation of the transformation coefficient in the computer simulation of electric-power systems of arbitrary configurations / V.A. Tarasov, A.G. Leisle, A.B. Petrochenkov // Russian Electrical Engineering. – 2017. – Vol.88. – No.11. – P.732–737. DOI:10.3103/S1068371217110141.)

19. Тарасов, В.А., Компьютерный комплекс для испытаний газотурбинных электро-

станций / В.А. Тарасов, А.Б. Петроченков, Б.В. Кавалеров // Электротехника. – 2017. – № 11. – С.55–60. (Tarasov, V.A. A computer-aided facility for testing gas-turbine power stations / V.A. Tarasov, A.B. Petrochenkov, B.V. Kavalerov // Russian Electrical Engineering. – 2017. – Vol.88. – No.11. – P.750–754. DOI:10.3103/S1068371217110153.)

20. Петроченков, А.Б. Метод моделирования стационарных и квазистационарных режимов электроэнергетических систем / А.Б. Петроченков // Электротехника. – 2018. – № 11. – С.11–17. (Petrochenkov, A.B. A Simulation method of steady-state and quasi-steady-state modes of electric power systems / A.B. Petrochenkov // Russian Electrical Engineering. – 2018. – Vol.89. – No.11. – P.627–632. DOI: 10.3103/S1068371218110081.)

21. Тарасов, В.А. Моделирование электроэнергетических систем сложной структуры / В.А. Тарасов, А.Б. Петроченков, Б.В. Кавалеров // Электротехника. – 2018 – № 11. – С.47–53. (Tarasov, V.A. Simulation of complex electric power systems / V.A. Tarasov, A.B. Petrochenkov, B.V. Kavalerov // Russian Electrical Engineering. – 2018. – Vol.89. – No.11. – P.664–669. DOI: 10.3103/S1068371218110123.)

в других рецензируемых журналах:

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

23. Тарасов, В.А. Паттерны объектно-ориентированного проектирования в системе расчета параметров электрических цепей матричным способом / В.А. Тарасов, В.П. Куприн, А.Б. Петроченков // Вестник Перм. гос. техн. ун-та. Сер. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010. – №4. – С.77–81.

24. Iarmonova, O. Development of gas turbine fast mathematical model simulation module for software complex «Electrodin» based on LabVIEW / O. Iarmonova, A. Petrochenkov, B. Krause // European Researcher. – 2013. – Vol. (61). – № 10–2. – P.2488–2501. DOI: 10.13187/issn.2219-8229.

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

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

27. Ляхомский, А.В. Концептуальное проектирование и инжиниринг повышения энергоэффективности / А.В. Ляхомский, А.Б. Петроченков, Е.Н. Перфильева // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 9. – С.360–364.

28. Разработка системы поддержки управленческих решений по интеллектуальному управлению объектами нефтедобычи на месторождениях нефти и газа / А.Б. Петроченков, А.В. Ромодин, И.С. Лузянин, В.В. Селезнев, В.А. Шамаев // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2018. – Т.16. – №9. – С.59–67.

в сборниках материалов, трудах конференций, индексируемых международными базами цитирования SCOPUS и Web Of Science:

29. Petrochenkov, A. Methodical bases of the integrated electrotechnical complexes life cycle logistic support / A. Petrochenkov // Proceedings of 1st International Conference on Applied Innovations in IT / Eduard Siemens (editor in chief) [et al.]. – Dessau, Anhalt University of Ap-

plied Sciences, 2013. – P.7–11. DOI: 10.13142/kt10001.02.

30. Petrochenkov, A.B. Management of effective maintenance of the electrotechnical complexes of mineral resource industry's enterprises based on energy-information model / A.B. Petrochenkov // 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.

31. Conceptual design and engineering strategies to increase energy efficiency at enterprises: Research, technologies and personnel / A. Lyakhomskii, E. Perfilieva, A. Petrochenkov, S. Bochkarev // IEEE Conference Publications. Proceedings of 2015 IV Forum Strategic Partnership of Universities and Enterprises of Hi-Tech Branches (Science. Education. Innovations). – 2015. – P.44–47. DOI: 10.1109/IVForum.2015.7388249. WOS: 000380529800015.

32. Petrochenkov, A. An approach to assessment of the technical condition of overhead transmission lines / A. Petrochenkov // Proceedings of the 4th International Conference on Applied Innovations in IT (2016). Vol. IV. Koethen: Hochschule Anhalt, 2016, P.1–7. DOI:10.13142/KT10004.01. WOS:000411220800001.

33. Luzyanin, I. Regarding developing of program-technical system for analyzing operating modes of power-supply systems in oil producing companies / I. Luzyanin, A. Petrochenkov // Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference. – 2017. – P.1553–1557. DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910868. WOS:000403395600382.

34. Luzyanin, I. Practical aspects of software developing for the system of structural and functional analysis of power supply systems in oil companies / I. Luzyanin, A. Petrochenkov // Proceedings Of The 5th International Conference On Applied Innovations In IT (2017). – Vol.V. – Koethen: Hochschule Anhalt. – 2017. – P.65–69. DOI: 10.13142/KT10005.31. WOS: 000402660300009.

35. Petrochenkov, A. Developing the decision support system on controlling operational modes of electric power supply systems in oil companies / A. Petrochenkov, I. Luzyanin // Proceedings of 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2017. – 2017. – P.469–471. DOI: 10.1109/SCM.2017.7970620. WOS:000425254800140.

36. Luzyanin, I. Detection of changes in oil well power consumption profile on the basis of dynamic time warping algorithm / I. Luzyanin, A. Petrochenkov // Proceedings Of International Conference on Applied Innovation in IT. – Vol.6. – Is.1. – Koethen: Hochschule Anhalt. – 2018. – P.1–10. DOI: 10.13142/kt10006.11.

37. Development of an algorithm for transition from an electric-power system visual representation to a parametric representation / A. Kusakin, A. Petrochenkov, D. Leizgold, I. Luzyanin // Proceedings Of International Conference on Applied Innovation in IT. – Vol.6. – Is.1. – Koethen: Hochschule Anhalt. – 2018. – P.77–83. DOI: 10.13142/kt10006.28.

38. Experience in developing a physical model of submersible electrical equipment for simulator systems: research and training tasks on the agenda of a key employer / A.B. Petrochenkov, A.V. Romodin, S.V. Mishurinskikh, V.V. Seleznev, V.A. Shamaev // Proceedings of 2018 XVII Russian Scientific and Practical Conference on Planning and Teaching Engineering Staff for the Industrial and Economic Complex of the Region (PTES), Saint Petersburg, Russia. – 2018. – P.114–117. DOI: 10.1109/PTES.2018.8604169. WOS:000458979100033.

39. Kusakin, A.V. Development of ESS virtual presentation in LabVIEW / A.V. Kusakin, A.B. Petrochenkov, I.S. Luzyanin // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2018. – 2018. – P.701–704. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317190. WOS:000450337100169.

40. Luzyanin, I. Uncertainty analysis of oil well flow rate on the basis of differential entropy / I. Luzyanin, A. Petrochenkov, S. Bochkarev // Proceedings Of International Conference on Applied Innovation in IT, ICAIIT 2019. – Vol.7. – Is.1. – Koethen; Germany. – 2019. – P.65–71. DOI: 10.25673/13484.

в сборниках материалов, трудах конференций, индексируемых РИНЦ:

41. Петроченков, А.Б. Редактор свойств элемента электроэнергетической системы для программного моделирующего комплекса на языке JAVA / А.Б. Петроченков, К.А. Один // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике: материалы IV Всерос. науч.-техн. интернет-конф.; г. Пермь, 1–31 октября 2010 г. – Пермь: Изд-во Перм. национального исслед. политехн. ун-та, 2011. – С.188–198.

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

43. Петроченков А.Б. Рекомендации по управлению эксплуатационной документацией, обеспечивающей эффективное функционирование электротехнических комплексов, в задачах подготовки и переподготовки кадров // Труды X Международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2018. – Новочеркасск, 2018. – С.235–239.

в электронном ресурсе международной конференции:

44. Petrochenkov, A. Developing a fast mathematical model simulation module for microgrids based on LabVIEW [Электронный ресурс] / A. Petrochenkov, I. Kiselyov. – Электрон.дан. (1 файл). – Остин, США: NI Week 2016, 2016. – Режим доступа: <https://forums.ni.com/t5/Past-NIWeek-Sessions/TS9549-Developing-a-Fast-Mathematical-Model-Simulation-Module/ta-p/3317158?profile.language=en>, свободный (дата обращения: 15.09.2019).

в научной монографии:

45. Математическое моделирование газотурбинных мини-электростанций и мини-энергосистем: моногр. / В.М. Винокур, Б.В. Кавалеров, А.Б. Петроченков, М.Л. Сапунков. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010, 2010. – 299 с.

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

46. 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.]; заявитель и правообладатель: ФГБОУ ВПО ПНИПУ. – № 2012129075/28 (045549); заявл. 10.07.2012; опубл. 27.12.2013, Бюл. № 36. – 9 с.

47. Пат. № 2505342 РФ, МПК B01D 47/06. Установка для очистки вредных выбросов в атмосферу / А.И. Цаплин, С.В. Бочкарев, А.Б. Петроченков [и др.]; заявители и правообладатели: ФГБОУ ВПО ПНИПУ, ОАО «Протон-Пермские моторы». – № 2012103630/05; заявл. 02.02.2012; опубл. 27.01.2014, Бюл. № 3. – 10 с.

48. Пат. № 2513871 РФ, МПК H02P 7/06, H02P 7/285, H02P 7/292, G05B 11/01. Электропривод постоянного тока с упругими связями / В.П. Казанцев, Д.А. Даденков, А.Б. Петроченков [и др.]; заявители и правообладатели: ФГБОУ ВПО ПНИПУ, ОАО «Протон-Пермские моторы». – № 2012144926/07; заявл. 22.10.2012; опубл. 20.04.2014, Бюл. № 11. – 14 с.

49. Пат. № 2672163 РФ, МПК G09B 19/00 (2006.01). Интерактивная автоматизированная система для проведения научных исследований, проектирования и обучения персонала эксплуатации электротехнических комплексов в нефтяной отрасли / А.В. Ромодин, С.В. Бочкарев, В.В. Селезнев, А.Б. Петроченков [и др.]; заявитель и правообладатель: ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ». – № 2018118686; заявл. 21.05.2018; опубл. 12.11.2018, Бюл. № 32. – 12 с.

50. Пат. № 2673869 РФ, МПК G01L 3/04 (2006.01), G01L 5/26 (2006.01), G01L 3/44 (2006.01), G01L 15/14 (2006.01). Стенд для измерения энергетических показателей энергоустановок / С.В. Бочкарев, В.Г. Тонконог, А.Л. Тукмаков, А.Б. Петроченков [и др.]; заявитель и правообладатель: ФГБОУ ВО ПНИПУ. – № 2018100378; заявл. 09.01.2018; опубл. 30.11.2018, Бюл. № 34. – 10 с.

51. Св-во об офиц. регистр. программы для ЭВМ № 2005612141 РФ. Программа «Power System Supply» / В.М. Винокур, А.Б. Петроченков [и др.]; заявитель и правообладатель: ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез». – № 2005611666; заявл. 05.07.2005; опубл. 19.08.2005.

52. Св-во об офиц. регистр. программы для ЭВМ № 2007611452 РФ. Программа «Система информационной поддержки управления жизненным циклом электротехнического оборудования ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» / В.К. Гладков, В.А. Чекменев, С.Ю. Зубарев, А.Б. Петроченков [и др.]; заявитель и правообладатель: ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ». – № 2007610466; заявл. 12.02.2007; опубл. 06.04.2007.

53. Св-во о гос. регистр. программы для ЭВМ № 2011611839 РФ. Программный комплекс «Комплекс математических моделей электрогенератора и электросети» («КМЭС») / А.Б. Петроченков [и др.]; заявители и правообладатели: ГОУ ВПО ПГТУ, ОАО «Авиадвигатель». – № 2010618413; заявл. 30.12.2010; опубл. 28.02.2011.

54. Св-во о гос. регистр. базы данных № 2011620475 РФ. «База данных «Energy Data Ware» («БД «Energy Data Ware») / А.Б. Петроченков [и др.]; заявитель и правообладатель: ГОУ ВПО ПГТУ. – № 2011620330; заявл. 03.05.2011; опубл. 28.06.2011.

55. Св-во о гос. регистр. программы для ЭВМ № 2011615037 РФ. «Система управления базой данных «Energy Data Ware» («СУБД «Energy Data Ware») / А.Б. Петроченков [и др.]; заявитель и правообладатель: ГОУ ВПО ПГТУ. – № 2011613200; заявл. 03.05.2011; опубл. 28.06.2011.

56. Св-во о гос. регистр. базы данных № 2011620476 РФ. «База данных технического обслуживания и ремонта электродвигателей» («БД ТОиР ЭД») / А.Б. Петроченков [и др.]; заявитель и правообладатель: ГОУ ВПО ПГТУ. – № 2011620331; заявл. 03.05.2011; опубл. 28.06.2011.

57. Св-во о гос. регистр. программы для ЭВМ № 2011615038 РФ. «Система управления базой данных технического обслуживания и ремонта электродвигателей» («СУБД ТОиР ЭД») / А.Б. Петроченков [и др.]; заявитель и правообладатель: ГОУ ВПО ПГТУ. – № 2011613201; заявл. 03.05.2011; опубл. 28.06.2011.

58. Св-во о гос. регистр. программы для ЭВМ № 2012660288 РФ. «ЭлектроДин» / А.Б. Петроченков [и др.]; заявители и правообладатели: ФГБОУ ВПО ПНИПУ, ОАО «ПРОТОН-Пермские моторы». – № 2012617929; заявл. 21.09.2012; опубл. 01.11.2012.

59. Св-во о гос. регистр. базы данных № 2012621177 РФ. «База данных ЭлектроДин» / А.Б. Петроченков [и др.]; заявители и правообладатели: ФГБОУ ВПО ПНИПУ, ОАО «ПРОТОН-Пермские моторы». – № 2012620996; заявл. 21.09.2012; опубл. 01.11.2012.

60. Св-во о гос. регистр. программы для ЭВМ № 2018613079 «Расчёт параметров схем электроснабжения (РПСЭС) ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» / В.В. Селезнев, В.А. Шамаев, В.К. Гладков, Д.Н. Черемных, А.Б. Петроченков [и др.]; заявитель и правообладатель: ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ». – № 2018610284; заявл. 15.01.2018; опубл. 02.03.2018.

61. Св-во о гос. регистр. базы данных № 2018620596 «База данных схем электроснабжения и паспортных характеристик электрооборудования ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» / В.В. Селезнев, В.А. Шамаев, В.К. Гладков, Д.Н. Черемных, А.Б. Петроченков [и др.]; заявитель и правообладатель: ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ». – № 2018620270; заявл. 05.03.2018; опубл. 19.04.2018.

62. Св-во о гос. регистр. программы для ЭВМ № 2018664902. Программа для расчета КПД турбины («Расчет КПД») / В.Г. Тонконог, А.Л. Тукмаков, С.В. Бочкарев, А.Б. Петроченков [и др.]; заявитель и правообладатель: ФГБОУ ВО ПНИПУ. – № 2018662175; заявл. 02.11.2018; опубл. 26.11.2018.

Личный вклад автора в работы, опубликованные в соавторстве, состоит в том, что в работах [22, 23, 28, 31, 44] предложены методы исследования, принципы и способы повышения эффективности функционирования электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли; в работах [1–4, 15, 19, 21, 34–36, 41, 45] обоснованы структуры и алгоритмы информационно-программной среды для управления состоянием элементов электротехнических комплексов на различных этапах жизненного цикла, совместимой с информационно-аналитическими системами производства; в работах [8, 12, 17, 18] предложены алгоритмы учета взаимодействия элементов электротехнических комплексов при их моделировании; в работах [5, 6] сформулированы принципы оценки и организации экспертного исследования факторов риска отказов электротехнического оборудования предприятий минерально-сырьевой отрасли; в работах [11, 25, 26] обоснована и предложена иерархическая структура системы мониторинга и технической диагностики элементов электротехнических комплексов, типизированных по классификационным признакам взаимодействия в энергоинформационной модели; в работах [9, 14] обоснована модель интеллектуальной среды, осуществляющей поддержку функционирования элементов электротехнических комплексов; в работах [24, 27, 33, 37–40] обоснованы и предложены научно-технические решения и мероприятия, обеспечивающие повышение эффективности функционирования электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли.

В формулах патентов и свидетельств о регистрации баз данных и программ для ЭВМ [46–62] указан личный вклад автора, совпадающий с тематикой диссертационного исследования.