На правах рукописи



БУЛАТОВ ЮРИЙ НИКОЛАЕВИЧ

МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ГЕНЕРИРУЮЩИМИ УСТАНОВКАМИ ОБЪЕКТОВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С НИЗКИМ КАЧЕСТВОМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Специальность 2.4.3 – Электроэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Братск – 2026

Работа выполнена на кафедре энергетики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Братский государственный университет» (ФГБОУ ВО «БрГУ»).

Научный консультант:	доктор технических наук, профессор **Крюков Андрей Васильевич**
Официальные оппоненты:	**Илюшин Павел Владимирович**, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт энергетических исследований Российской академии наук», г. Москва, центр интеллектуальных электроэнергетических систем и распределенной энергетики, руководитель центра; **Куликов Александр Леонидович**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород, кафедра «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника», профессор кафедры; **Паздерин Андрей Владимирович**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, кафедра «Автоматизированных электрических систем», заведующий кафедрой.
Ведущая организация:	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск.

Защита состоится «18» марта 2027 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.347.05 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, корпус I, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте организации www.nstu.ru.

Автореферат разослан «__» декабря 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.347.05
д.т.н., доцент Анатолий Анатольевич Осинцев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современная электроэнергетика развивается с использованием технологий цифровых систем, комплексов мониторинга, диагностики и управления на основе концепций кибер-физических систем, энергетического интернета – «Энерджинет», Цифровой трансформации 2030, предполагающих применение интеллектуальных технологий. Эти концепции развития электроэнергетических систем (ЭЭС) предусматривают использование объектов распределенной генерации (РГ) мощностью до 25 МВт, собственниками которых могут быть как генерирующие компании, так и отдельные потребители электроэнергии. При этом под объектом РГ понимается электростанция, состоящая из одной или нескольких генерирующих установок (ГУ). Также предполагается широкое использование накопителей электроэнергии (НЭ) для совместного с объектами РГ участия в рынке электроэнергии, оказания системных услуг, взаимного резервирования и повышения надежности электроснабжения потребителей.

Распределенная энергетика как явление в России уже состоялась и будет только активно развиваться. Решениям задач применения технологий РГ в России посвящены работы В.К. Аверьянова, М.О. Арсентьева, Ф.Л. Быка, Н.И. Воропая, П.В. Илюшина, Б.Б. Кобеца, А.Л. Куликова, А.В. Праховника, А.В. Федяева, А.Г. Фишова и многих других ученых.

Широкое распространение получили ГУ объектов РГ на базе синхронных генераторов. При объединении между собой ГУ объектов РГ может образовываться сетевой кластер (microgrid) для повышения надежности электроснабжения потребителей или в системах низкого качества электроэнергии. Для объектов РГ их объединений существуют аналогичные, как и для больших ЭЭС проблемы, связанные с обеспечением устойчивости параллельной работы генераторов при различных возмущениях. При этом существенным фактором, определяющим устойчивость работы генераторов малой мощности, является относительно маленький момент инерции. В результате для нарушения устойчивости требуется возмущение меньшее, чем для генераторов большой мощности. Ситуация еще больше усугубляется, если генератор работает в системе с низким качеством электроэнергии. Это может привести к отключению защитами генерирующих установок и к прекращению электроснабжения или ограничению мощности потребителей электроэнергии, и как следствие – к большим ущербам. Поэтому крайне важно, чтобы ГУ и их объединения были способны гибко приспосабливаться к постоянно изменяющимся условиям и режимам работы систем электроснабжения (СЭС). Это возможно при разработке и использовании новых регуляторов, методов и алгоритмов их настройки. Таким образом, обеспечение устойчивой работы ГУ объектов РГ при различных возмущениях, в том числе и в условиях низкого качества электроэнергии, а также разработка их систем управления, обеспечивающих гибкость и живучесть, является актуальной

научно-технической проблемой, имеющей важное народно-хозяйственное значение для экономики России.

Устойчивую и стабильную работу ГУ объектов РГ, работающих в промышленных СЭС, возможно обеспечить путем развития методов настройки и синтеза автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) и частоты вращения (АРЧВ) ротора генератора. Необходимо отметить, что в пиковых и аварийных режимах, а также в условиях низкого качества электроэнергии особенно могут проявляться взаимные влияния АРВ и АРЧВ синхронных генераторов. В связи с этим для ГУ объектов РГ с малой постоянной инерции ротора генератора задачи взаимосвязанной настройки АРВ и АРЧВ являются актуальными. Принципам построения и методов настройки параметров регуляторов генераторов, а также исследованию устойчивости и электромеханических переходных процессов синхронных машин и их систем посвящено множество научных работ. Большой вклад внесли ученые: М.В. Андреев, А.Н. Беляев, М.М. Ботвинник, В.В. Бушуев, В.А. Веников, Н.И. Воропай, А.З. Гамм, А.С. Герасимов, Г.Р. Герценберг, А.А. Горев, И.А. Груздев, О.В. Гуриков, А.Н. Дойников, А.Х. Есипович, П.С. Жданов, А.С. Зеккель, И.В. Игнатьев, Д.А. Кабанов, Т.Г. Климова, С.А. Лебедев, М.Л. Левинштейн, И.В. Литкенс, А.Г. Логинов, Н.И. Овчаренко, А.В. Паздерин, В.И. Пантелеев, М.И. Покровский, А.А. Рагозин, Ю.Н. Руденко, С.В. Смоловик, Д.В. Сорокин, В.А. Строев, Е.И. Ушаков, О.В. Щербачев, А.А. Юрганов, R.H. Park, G. Cron, P.M. Anderson, A.A. Fouad, P. Kondur, D. Concordia, M.A. Pai и многие другие. Однако в современных условиях развития науки и техники, а также в виду увеличения используемых объектов РГ в ЭЭС требуется пересмотр систем регулирования и методов их настройки для генераторов малой мощности. Необходима разработка новых систем автоматического управления ГУ с учетом специфики, условий работы и влияния потребителей электроэнергии. Например, одним из достаточно емких потребителей электроэнергии является железнодорожный транспорт. В Восточной Сибири и на Дальнем Востоке электрическая сеть связана с тяговыми подстанциями (ТП) железнодорожных магистралей. В связи с резкопеременной и однофазной тяговой нагрузкой показатели качества электроэнергии в этих системах могут выходить за допустимые пределы. В результате эксплуатируются СЭС с пониженным качеством электроэнергии. Также в современных СЭС увеличилось число электроприемников с нелинейной вольтамперной характеристикой и использование различных преобразователей на основе силовой электроники, работающих на высокой частоте. Все это определяет актуальность задач управления режимами СЭС и ГУ объектов РГ, работающих в условиях низкого качества электроэнергии.

Степень разработанности темы исследования. Большой вклад в решение задач управления качеством электроэнергии и режимами ЭЭС с РГ, в том числе с применением интеллектуальных технологий, внесли: В.А. Баринов, Л.Л. Богатырев, О.М. Бударгин, В.Н. Вариводов, Н.И. Воропай, В.Г. Гольдштейн, В.В. Дорофеев, В.П. Закарюкин, П.В. Илюшин, Б.Б. Кобец, А.В. Крюков,

А.Л. Куликов, В.Г. Курбацкий, Ю.Н. Кучеров, Е.И. Логинов, А.А. Макаров, Э.Б. Наумов, А.А. Осинцев, А.В. Паздерин, Б.В. Папков, В.Н. Рябченко, В.Н. Седунов, К.В. Суслов, Н.В. Томин, А.Г. Фишов, Ю.Г. Шакарян, C.W. Gelling, N.D. Hatziargyriou, S.A. Papathanassiou, Z. Styczynski и многие другие ученые. Их работы создали базу для применения существующих и разработки новых технических решений для надежного применения ГУ объектов РГ в ЭЭС (СЭС). Однако задачи настройки и синтеза систем автоматического регулирования (САР) ГУ объектов РГ, работающих в условиях низкого качества электроэнергии, недостаточно изучены.

Объект исследования: генерирующие установки объектов распределенной генерации с системами автоматического регулирования, работающие в системах электроснабжения с низким качеством электроэнергии.

Предмет исследования: методы настройки и алгоритмы систем автоматического регулирования и противоаварийного управления генерирующими установками объектов распределенной генерации.

Цель работы: разработка методов настройки, алгоритмов систем автоматического регулирования и интеллектуального управления генерирующими установками объектов распределенной генерации, функционирующих в условиях низкого качества электроэнергии.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе сформулированы и решены следующие **задачи:**

1. Разработка имитационных моделей генерирующих установок объектов РГ с системами автоматического регулирования.
2. Разработка метода идентификации модели генерирующей установки, работающей на основе синхронного генератора.
3. Оценка влияния низкого качества электроэнергии в СЭС на синхронные генераторы малой мощности.
4. Оценка возможности использования вставок постоянного тока (ВПТ) и энергетических роутеров в СЭС с низким качеством электроэнергии для подключения генерирующих установок объектов РГ.
5. Разработка методов настройки и построения алгоритмов систем автоматического регулирования генерирующих установок с использованием интеллектуальных технологий.
6. Разработка алгоритмов функционирования и методов настройки автоматических регуляторов синхронных генераторов малой мощности с прогнозирующими свойствами, и исследование их влияния на показатели качества процессов регулирования и качества электроэнергии в СЭС, в том числе при широком изменении параметра настройки этих регуляторов.
7. Разработка методов устранения фликера и улучшения качества электроэнергии в части несимметрии и несинусоидальности напряжения в электрических сетях с распределенной генерацией.
8. Разработка на базе уравнений предельных режимов метода оценки запаса устойчивости ЭЭС с генерирующими установками объектов РГ и метода

противоаварийного управления таких систем для обеспечения плавного динамического перехода в послеаварийных режимах.

Научная новизна работы:

1. Разработан метод идентификации модели генерирующей установки на основе экспериментальных данных, отличающийся от известных применением вейвлет-преобразования для выделения шумов регуляторов и использованием искусственных нейронных сетей с системой нечеткого логического вывода для уточнения модели в условиях низкого качества электроэнергии и изменяющихся режимов работы системы электроснабжения.

2. Реализован новый метод оптимизации параметров настройки АРВ и АРЧВ синхронных генераторов малой мощности с учетом взаимного влияния этих регуляторов и использованием адаптивного генетического алгоритма.

3. Разработаны алгоритмы функционирования локальных и групповых самонастраивающихся прогностических регуляторов напряжения и частоты генерирующих установок объектов распределенной генерации.

4. Разработаны структура, алгоритм работы и имитационная модель нового АРЧВ с самонастраивающимся инерционно-форсирующим звеном для асинхронного генератора двойного питания, позволяющего эффективно регулировать скорость вращения ротора и частоту в системах электроснабжения с низким качеством электроэнергии.

5. Предложены методы устранения фликера, улучшения качества электроэнергии по несимметрии, несинусоидальности и отклонению напряжения в электрических сетях с распределенной генерацией, отличающиеся от известных использованием согласованной настройки АРВ и АРЧВ синхронных генераторов, а также ВПТ и управляемых энергетических роутеров с накопителями электроэнергии.

6. Разработан метод адаптивного управления настройками АРВ и АРЧВ синхронных генераторов, отличающийся от известных совместным использованием искусственных нейронных сетей, нечёткого логического вывода и метода согласованной настройки регуляторов.

7. Предложен метод противоаварийного управления генерирующими установками объектов РГ, отличающийся от известных применением модифицированных уравнений предельных режимов ЭЭС и обеспечением плавного динамического перехода с помощью адаптивного управления настройкой регуляторов синхронных генераторов.

Теоретическая и практическая значимость. Получены новые научные данные о процессах, закономерностях и режимах работы СЭС с РГ в условиях пониженного качества электроэнергии. Представленные в диссертационной работе методы и алгоритмы реализованы в виде программ для ЭВМ. На разработанный способ автоматического регулирования частоты синхронного генератора малой мощности и регулятор для его реализации получен патент РФ. Практическая значимость работы при этом определяется тем, что с использованием разработанных методов и алгоритмов возможно решение следующих задач:

определение областей допустимой работы ГУ в условиях низкого качества электроэнергии; идентификация моделей ГУ на основе экспериментальных данных; улучшение качества электроэнергии в СЭС с генераторами малой мощности; расчет запаса устойчивости и надежный ввод режима ЭЭС в область устойчивости; адаптивное управление ГУ и др. Практическую значимость также определяют разработанные имитационные модели, которые возможно использовать в проведении дальнейших исследований.

Автоматические регуляторы, способы синтеза и настройки которых разработаны, имеют простую структуру, используют только доступные для измерения параметры, легко реализуются и могут использоваться как локальные и групповые регуляторы возбуждения и частоты вращения синхронных генераторов для обеспечения гибкой, адаптивной и устойчивой работы. Разработанное программное обеспечение может использоваться для идентификации моделей ГУ на основе экспериментальных данных и расчета параметров настройки регуляторов.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы используются в ООО «ЕвросибЭнерго-Гидрогенерация» в виде программного комплекса для определения согласованной настройки АРВ и АРЧВ синхронных генераторов гидроэлектростанций, а также в виде моделей прогностических АРВ и АРЧВ и рекомендаций по их настройке.

Представленные в работе методы улучшения качества электроэнергии и расчета запаса статической апериодической устойчивости использованы при анализе режимов работы распределительных электрических сетей в филиале Иркутской электросетевой компании «Северные электрические сети».

Результаты работы переданы для использования в АО «ХОЛДИНГ ЭРСО» в виде моделей и результатов моделирования энергетического роутера на основе высокочастотного трансформатора и преобразовательного оборудования для подключения потребителей к системе электроснабжения с низким качеством электроэнергии. Разработанные модели локальных и групповых прогностических регуляторов напряжения и частоты генерирующих установок используются в АО «ХОЛДИНГ ЭРСО» в исследовательских целях при моделировании регуляторов мощности синхронных генераторов и двигателей малой мощности.

Результаты диссертационной работы переданы для использования в ПАО «Мосэнерго» в виде разработанных методов настройки АРВ и АРЧВ синхронных турбогенераторов, а также в виде моделей прогностических АРВ и АРЧВ, которые используются в исследовательских целях с возможностью применения для турбогенераторов тепловых электростанций.

Результаты диссертационной работы приняты к использованию в проектной деятельности электротехнической лаборатории отдела учета и качества электроэнергии (ЭТЛ ОУКЭ) научно-исследовательского и проектно-изыскательского республиканского унитарного предприятия «Белэнергосетьпроект» (г. Минск, Республика Беларусь).

Результаты диссертации внедрены и используются в учебном процессе по дисциплинам «Основы теории автоматического управления», «Математическое и компьютерное моделирование в электроэнергетике», «Имитационное моделирование в электроэнергетике» в ФГБОУ ВО «Братский государственный университет» и по дисциплинам «Управление качеством электроэнергии», «Управление электроэнергетическими системами в нормальных и аварийных режимах», «Распределенная генерация» в ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Согласованная настройка АРВ и АРЧВ синхронных генераторов малой мощности позволяет улучшить показатели качества регулирования напряжения и частоты в нормальных и аварийных режимах и повысить запас устойчивости. В среднем использование только согласованной настройки регуляторов позволяет снизить перерегулирование напряжения на 5% и время переходного процесса для напряжения в 3 раза, а для частоты вращения ротора в 1,4 раза в зависимости от тяжести возмущения.

2. Дополнение алгоритмов автоматического регулирования напряжения и частоты самонастраивающимся инерционно-форсирующим звеном улучшает показатели качества переходных процессов и обеспечивает устойчивость генерирующих установок объектов малой распределенной генерации при их групповом регулировании. В среднем определено, что использование в АРВ и АРЧВ самонастраивающегося инерционно-форсирующего звена позволяет снизить перерегулирование напряжения на 12% и время переходного процесса для напряжения в 2 раза, а для частоты вращения ротора в 6 раз в зависимости от тяжести возмущения. При этом устраняется колебательность для напряжения и частоты в переходном процессе.

3. Неоптимальная настройка регуляторов генерирующих установок объектов малой распределенной генерации снижает устойчивость и может вызывать фликер при подключении в электрической сети нагрузки сопоставимой с генератором мощности. Согласованная настройка АРВ и АРЧВ синхронных генераторов и их групповое регулирование на основе самонастраивающегося инерционно-форсирующего звена повышает устойчивость, улучшает качество электроэнергии по несимметрии, несинусоидальности напряжения и фликеру.

4. Метод адаптивного управления настройкой АРВ и АРЧВ синхронных генераторов на основе искусственных нейронных сетей, системы нечёткого логического вывода и согласованной настройки регуляторов позволяет улучшить показатели качества регулирования напряжения и частоты в переходном процессе. В среднем адаптивное управление настройкой АРВ и АРЧВ позволяет снизить перерегулирование напряжения на 2,5% и время переходного процесса для напряжения в 5 раз, а для частоты вращения ротора в 3 раза в зависимости от тяжести возмущения.

5. Обеспечить плавный динамический переход при разгрузке генерирующих установок объектов распределенной генерации в результате противоаварийного

управления позволяют нейро-нечеткая система управления согласованной настройкой АРВ и АРЧВ генераторов и самонастраивающееся инерционно-форсирующее звено в регуляторах.

Соответствие паспорту научной специальности. Диссертационная работа соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.4.3 Электроэнергетика:

• П.14. Разработка методов расчета и моделирования установившихся режимов, переходных процессов и устойчивости электроэнергетических систем и сетей, включая технико-экономическое обоснование технических решений, разработка методов управления режимами их работы (соответствует пункту 7 научной новизны);

• П.16. Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике (соответствует пунктам 2, 3, 4, 6 и 7 научной новизны);

• П.19. Разработка методов и устройств контроля, анализа и управления качеством электроэнергии (соответствует пункту 5 научной новизны);

• П.20. Разработка методов использования информационных и телекоммуникационных технологий и систем, искусственного интеллекта в электроэнергетике, включая проблемы разработки и применения информационно-измерительных, геоинформационных и управляющих систем для оперативного и ретроспективного мониторинга, анализа, прогнозирования и управления электропотреблением, режимами, надежностью, уровнем потерь энергии и качеством электроэнергии (соответствует пунктам 1, 2 и 6 научной новизны).

Достоверность результатов научных исследований. Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается их соответствием законам электротехники и теории автоматического управления. В работе использовались корректные и адекватные математические и имитационные модели, описывающие исследуемые процессы в различных режимах работы электроэнергетических систем. Выполнено сравнение результатов физического и имитационного моделирования с измерениями в реальных системах электроснабжения.

Методология и методы исследования. Использованы методы математического, имитационного и физического моделирования электроэнергетических систем, методы анализа электромеханических переходных процессов, методы автоматического регулирования и цифровой обработки сигналов. Имитационное моделирование выполнялось в системе MATLAB с использованием разработанных и стандартных блоков библиотек Simulink и SimPowerSystems. Проверка и исследование предложенных методов и алгоритмов основывалась на вычислительных экспериментах, проводимых применительно к имитационным моделям, а также на экспериментальных исследованиях, выполненных на физической модели генерирующей установки.

Связь работы с научными программами, планами, темами, грантами. Результаты диссертационной работы использованы при проведении энергетического обследования и инвентаризации объектов центральной

производственной площадки Хиагдинского месторождения в рамках НИР «Определение возможных режимов работы турбогенераторной установки энергокомплекса. Моделирование работы турбогенераторной установки энергокомплекса с использованием программного обеспечения» (ФГБОУ ВО «ЗабГУ», 2018 г.). Диссертационная работа частично выполнена в рамках НИР «Исследование режимов работы, качества электроэнергии и систем управления в электроэнергетических системах» (ФГБОУ ВО «БрГУ», 2021-2025 гг., Приказ №674 от 28.12.2020 г. код научной темы № 06-У-2101). Диссертационная работа частично выполнена в рамках НИР «Методы математического моделирования и управления кибер-физическими энергетическими системами: теория и приложения» (ФГБОУ ВО «ИрНИТУ», 2021-2022 гг., код научной темы № FZZS-2020-0039).

Личный вклад автора. Диссертация является законченной научной работой и результатом самостоятельных исследований автора и совместных с другими исследователями. Личный вклад автора в совместных работах состоит в разработке моделей и методов исследования, а также в получении, анализе, обсуждении данных, и обобщении результатов моделирования. Личное участие автора подтверждено опубликованными работами и свидетельствами о результатах интеллектуальной деятельности (3 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ и 1 патент на изобретение) и апробациями на научных конференциях, список которых приводится ниже. Положения, выносимые на защиту, результаты, определяющие научную новизну, и выводы диссертационной работы сформулированы автором самостоятельно. Диссертационная работа написана автором самостоятельно.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: Всероссийская научно-техническая конференция «Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири» (Братск, 2009-2019 гг., 2021-2025 гг.), Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Молодежь и современные информационные технологии» (Томск, 2009 г.), Конференция-конкурс научной молодежи «Системные исследования в энергетике» ИСЭМ СО РАН (Иркутск, 2009 г.), Международная научная конференция «Идентификация, измерение характеристик и имитация случайных сигналов (состояние, перспективы развития)» (Новосибирск, 2009 г.), Всероссийская конференции с международным участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири» (Иркутск, 2015, 2019, 2020 гг.), Международная научно-практической конференция «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (Иркутск, 2016, 2017, 2019, 2020 гг.), Всероссийская Байкальская с международным участием конференция «Информационные и математические технологии в науке и управлении» (Иркутск, 2017 г.), Международная молодёжная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи» (Казань, 2016 г.; Самара, 2017 г.; Иркутск, 2019 г., Ставрополь 2020 г.), International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (Челябинск, 2016 г.; Санкт-Петербург,

2017 г.; Москва, 2018 г.; Сочи, 2019 г.; 2020 г., 2022 г.), Международный молодёжный форум «Интеллектуальные энергосистемы» (Томск, 2017 г.), Международный научный семинар «Критические инфраструктуры: ситуационное управление, интеллектуальные, агентные, облачные вычисления и кибербезопасность» (Байкальск, 2018 г.), International Conference on Harmonics and Quality of Power (Ljubljana, 2018 г.; Naples, Italy 2022 г.), Международный научный семинар им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики» (Байкал 2018 г., Казань 2020 г., Алушта 2022 г., Байкал 2023 г., Архангельск 2024 г., Новосибирск 2025 г.), Всероссийская молодежная научно-практическая конференции с международным участием «Интеллектуальная энергетика на транспорте и в промышленности» (Омск, 2018 г.), International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (Владивосток, 2018-2021 гг.), International Russian Automation Conference (Сочи, 2018-2020 гг., 2022 г.), International Ural Conference on Green Energy (Челябинск, 2018-2021 гг.), Всероссийская научная конференция с международным участием «Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения» (Тольятти, 2019 г.), International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering «Elektroenergetika 2019» (Stara Lesna, 2019 г.), International Conference «Modern Electric Power Systems 2019» (Wroclaw, 2019 г.), International Symposium on Innovation and Sustainability of Modern Railway (Иркутск, 2019 г.), Международный семинар «Критические инфраструктуры в цифровом мире» (International workshop «Critical infrastructures in the digital world») (Байкальск, 2019-2021 гг., Большое Голоустное 2022 г.), Всероссийская молодежная конференция с международным участием «Системные исследования в энергетике – 2019» (Иркутск, 2019 г.), Международная научно-практическая конференция «Авиамашиностроение и транспорт Сибири» (Иркутск, 2019 г.), Международная конференция «Энергетика XXI века: устойчивое развитие и интеллектуальное управление» (Иркутск, 2020 г.), Всероссийская научно-практическая конференция «Энергетика и энергосбережение: теория и практика» (Кемерово, 2020 г.), Ural-Siberian Smart Energy Conference (Екатеринбург, 2020 г., Новосибирск, 2021 г.), International Colloquium on Intelligent Grid Metrology (2020 г.), Международная научно-практическая конференция «Материаловедение, машиностроение и энергетика: проблемы и перспективы развития» (Барнаул, 2020 г.), International scientific and practical conference «Actual problems of the energy complex: mining, production, transmission, processing and environmental protection» (Москва, 2020 г.), International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems (Прага, 2021 г.; 2022 г.), International Scientific Electric Power Conference (Санкт-Петербург, 2021 г.), Международный симпозиум «Устойчивая энергетика и энергомашиностроение – 2021: SUSE-2021» (Казань, 2021 г.), Международная научно-практическая конференция «Развивая энергетическую повестку будущего» (Санкт-Петербург, 2021 г.), International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (Кейптаун (Африка), 2021 г.), Международная научно-практическая конференция «Инновационные производственные технологии и ресурсосберегающая энергетика» (Омск, 2021 г.), International Conference on Power Science and Engineering (Турция,

2021 г.; 2022 г.), Международная научно-техническая конференция «Smart Energy Systems 2021» (Казань, 2021 г.), XIV International Scientific Conference “INTERAGROMASH" (2021 г.), International Conference on Electrical and Electronics Engineering (Турция, 2022 г.), Belarusian-Ural-Siberian Smart Energy Conference (Екатеринбург, 2023 г.), Всероссийская школа молодых ученых «Цифровизация, декарбонизация и децентрализация современной электроэнергетики» (Севастополь, 2024 г.).

Результаты диссертационной работы докладывались на совместном заседании Секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС» и Секции по проблемам НТП в энергетике Научного совета РАН по системным исследованиям в энергетике (г. Москва, Протокол №3 от 14.03.2023). Диссертационная работа докладывалась и обсуждалась на Международном Семинаре «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики», проводимом Институтом систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ) СО РАН (оз. Байкал, о. Ольхон, пос. Хужир, 9–15.07.2023).

Публикации. Основные результаты опубликованы в 117 работах, из них: 42 – в изданиях из перечня, рекомендованного ВАК (из которых 29 по специальности 2.4.3 Электроэнергетика и 19 из них имеют категорию 1 и 2), 44 – в изданиях индексируемых наукометрическими базами Scopus и Web of Science (из которых 10 имеют квартиль 1 и 2), 18 публикаций включены в Белый список (из которых 11 имеют уровень 1 и 2), 8 монографий, 19 – в сборниках и материалах конференций; получено 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и патент на изобретение.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка сокращений, списка литературы, содержащего 417 наименований, и 5 приложений. Материал изложен на 422 страницах, включающий 40 таблиц, 328 рисунков и 54 страницы приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы, степень разработанности темы исследования, определены объект и предмет исследования, сформулированы цели и задачи исследования, указана научная новизна работы, теоретическая и практическая значимость, представлены реализация результатов работы и апробация на семинарах и конференциях. Представлены основные положения, выносимые на защиту, методология и методы исследования, достоверность результатов исследования и структура диссертационной работы.

Первая глава посвящена проблемам управления ГУ объектов РГ в промышленных СЭС. Приводится обзор методов настройки АРВ и АРЧВ синхронных генераторов. Представлен краткий обзор интеллектуальных технологий управления с оценкой их применения в электроэнергетике. Рассматриваются основные проблемы обеспечения качества электроэнергии и возможные режимы работы в СЭС с РГ с возникающими задачами управления. В заключение первой главы приводится постановка задач диссертации.

Эффективная работа ГУ невозможна без применения развитых САР. Схема САР напряжения и частоты ГУ, реализованной на основе синхронного генератора и первичного двигателя на базе паровых, гидравлических, газовых и других турбин, показана на рис. 1. Регулирование напряжения и частоты у генератора осуществляется с помощью АРВ и АРЧВ, построенных на различных принципах. Для синхронных генераторов, работающих параллельно с ЭЭС, необходимо использовать АРВ сильного действия (АРВ-СД).

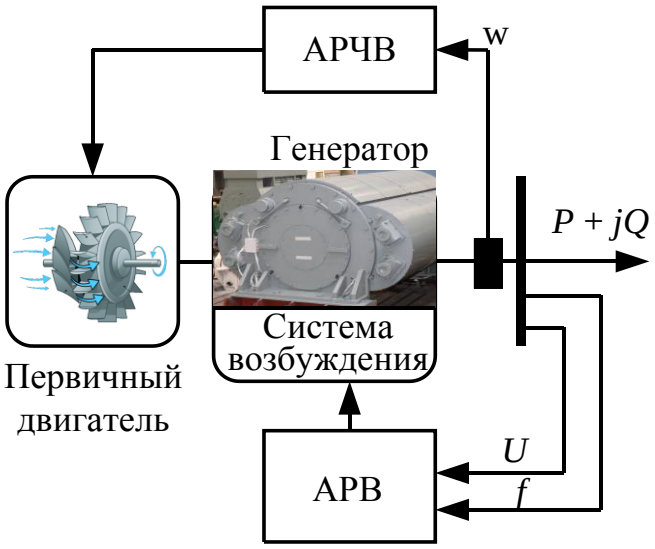


Рисунок 1 – Схема САР ГУ

Проведенный обзор методов настройки и технологий реализации АРВ и АРЧВ показывает, что применение интеллектуальных технологий и адаптивных алгоритмов для регулирования напряжения и частоты у синхронных генераторов является перспективным. Такой подход позволит построить и применять самонастраивающиеся АРВ и АРЧВ генераторов, что является весьма актуальным в условиях все большего ввода в эксплуатацию объектов РГ. Кроме того необходимость использования согласованного управления напряжением и частотой широко проявляется в пиковых и аварийных режимах и особенно для установок малой мощности, что требует пересмотра алгоритмов настройки и регулирования АРВ и АРЧВ синхронных генераторов.

В виду того, что большая часть современных СЭС работают с пониженным качеством электроэнергии, особенно в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке страны, что подтверждается соответствующими замерами, представляет большой интерес исследования поведения ГУ и влияние на них пониженного качества электроэнергии. При этом РГ может неоднозначно влиять на показатели качества электроэнергии (ПКЭ) и приводит к дополнительным проблемам при управлении режимами СЭС. Таким образом, внедрение объектов РГ в СЭС придает им новые свойства и создает новые проблемы в распределительных электрических сетях. Поэтому необходимо изучение свойств СЭС с объектами РГ для разработки новых алгоритмов САР ГУ и методов их настройки с целью регулирования напряжения и частоты с высокой точностью и повышения устойчивости.

Во второй главе представлены имитационные модели ГУ объектов РГ с системами автоматического регулирования, а также метод идентификации модели ГУ с применением вейвлет-преобразования на основе экспериментальных данных, который реализован в программном комплексе. Приводится метод совместного использования искусственных нейронных сетей (ИНС), генетического алгоритма (ГА) и системы нечеткого логического вывода (СНЛВ) для построения модели ГУ.

Существует множество методов и алгоритмов построения экспериментальных моделей, среди которых выделяются непараметрические, представленные в форме частотных характеристик (ЧХ). Спектральные характеристики исследуемого объекта могут быть получены с помощью аппарата дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Используя ДПФ, можно найти комплексный передаточный коэффициент системы, объекта регулирования или его отдельной части.

Нарушение нормальной работы ГУ нежелательно, поэтому предлагаемый метод идентификации базируется на пассивном подходе. В этом контексте в качестве тестового воздействия для построения комплексного передаточного коэффициента можно воспользоваться выделяемыми паразитными шумами регуляторов. Для идентификации модели генерирующей установки необходимо её представить структурной схемой, изображенной на рис. 2. В рамках этой структуры для формирования экспериментальных комплексных передаточных коэффициентов будут задействованы два управляющих воздействия от регуляторов, а также две регулируемые переменные: частота вращения ротора ω_g и напряжение генератора U_g.

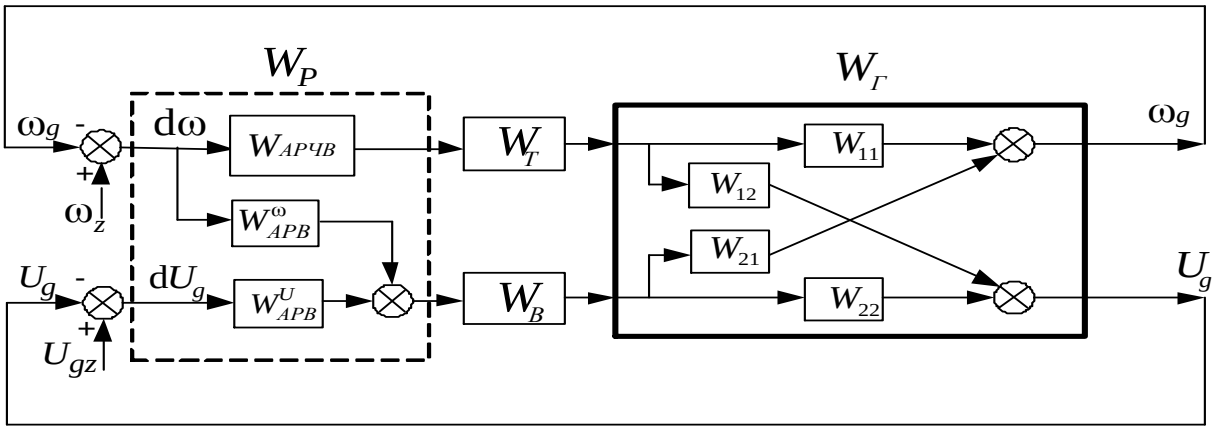


Рисунок 2 – Структура регулируемой ГУ

На рис. 2 обозначены комплексные передаточные коэффициенты следующих элементов: $W_Г$ – генератор, состоящий из основных каналов по напряжению и частоте с перекрестными связями; W_P – общий регулятор; W_T – турбина; W_B – возбудитель.

Алгоритм предложенного метода пассивной идентификации модели ГУ с системами автоматического регулирования частоты и напряжения иллюстрируется блок-схемой на рис. 3. Для создания комплексных передаточных коэффициентов многомерной модели регулируемой ГУ предлагается использовать шум регуляторов, выделяемый с помощью вейвлет-преобразования. Предлагаемые алгоритмы метода идентификации были проверены на двухсвязной системе. При этом на полученных с помощью шумов регуляторов ЧХ были заметны резкие колебания («изрезы»). Чтобы их сгладить предлагается применить цифровую фильтрацию сигналов с использованием весовых окон. Тогда экспериментальный комплексный передаточный коэффициент предлагается рассчитывать следующим образом:

$$W'(j\omega) = \frac{\sum_{i=1}^{\Omega} W_\gamma(\omega) \cdot \left|U(i\Delta\omega)\right|^2 \cdot W(i\Delta\omega)}{\sum_{i=1}^{\Omega} W_\gamma(\omega) \cdot \left|U(i\Delta\omega)\right|^2}, \quad (1)$$

где $W(i\Delta\omega) = \frac{Y(i\Delta\omega)}{U(i\Delta\omega)}$ – экспериментальный комплексный передаточный коэффициент, полученный при идентификации с помощью шума регуляторов; $U(i\Delta\omega)$ – спектр шума входного сигнала; $Y(i\Delta\omega)$ – спектр шума выходного сигнала; $W_\gamma(\omega)$ – весовая функция или весовое окно.

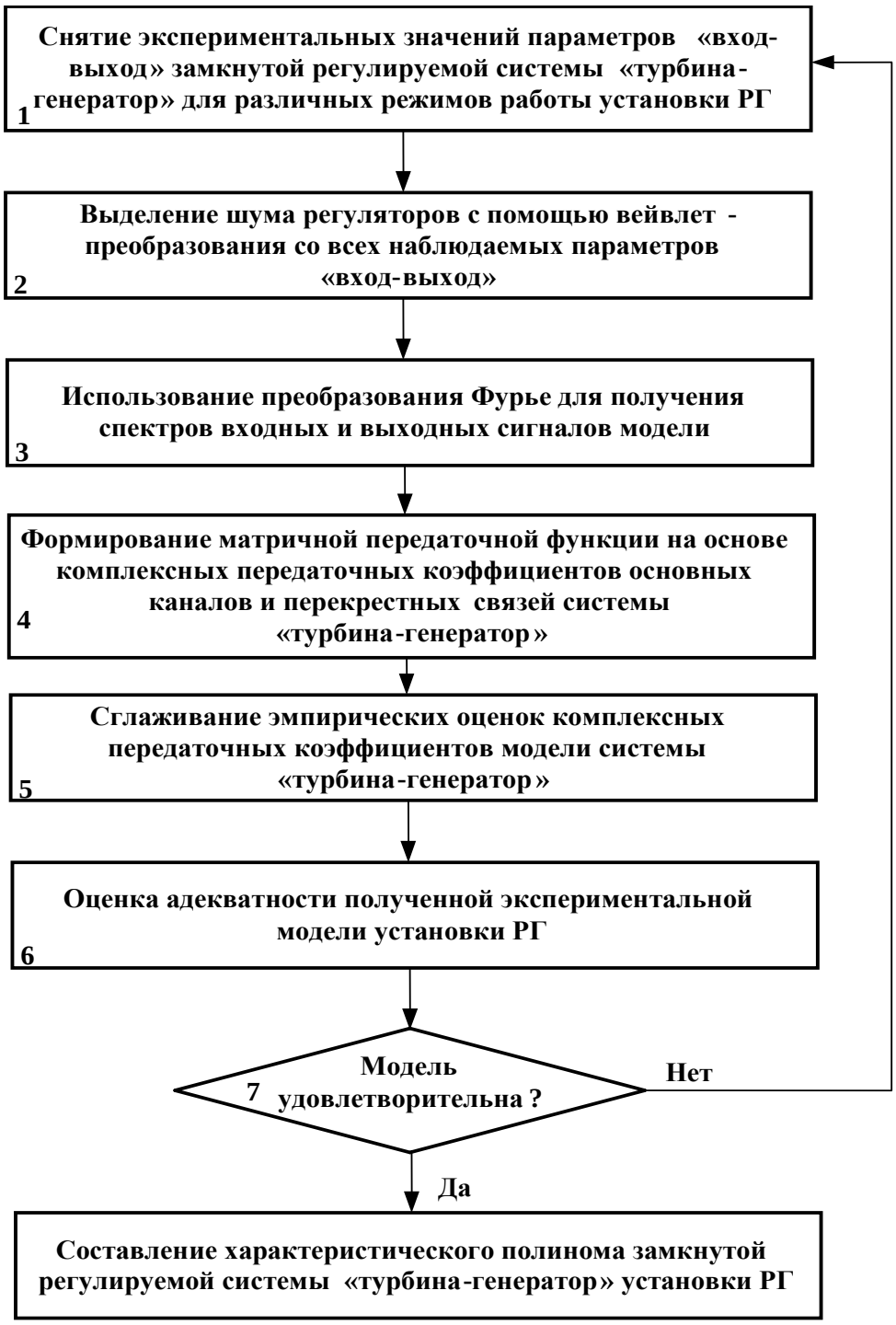


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма идентификации

В результате работы алгоритма идентификации находится характеристический полином САР как определитель матрицы:

$$\det\left[\mathbf{E} + \mathbf{W}_{\text{об}} \cdot \mathbf{W}_{\text{р}}\right], \tag{2}$$

где $\mathbf{E}$ – единичная матрица; $\mathbf{W}_{\text{об}}$ – матричная передаточная функция объекта, учитывающая комплексные передаточные коэффициенты генератора, турбины и возбудителя; $\mathbf{W}_{\text{р}}$ – матричная передаточная функция регулятора, учитывающая взаимосвязь АРВ и АРЧВ:

$$\mathbf{W}_{\mathbf{P}} = \begin{bmatrix} W_{APЧВ} & W^{\omega}_{APB} \\ 0 & W^{U}_{APB} \end{bmatrix}.$$

Разработанный алгоритм идентификации был внедрен в специализированный программный комплекс.

Алгоритм идентификации модели нелинейных объектов на основе СНЛВ, ИНС и ГА представлен в виде блок-схемы на рис. 4.

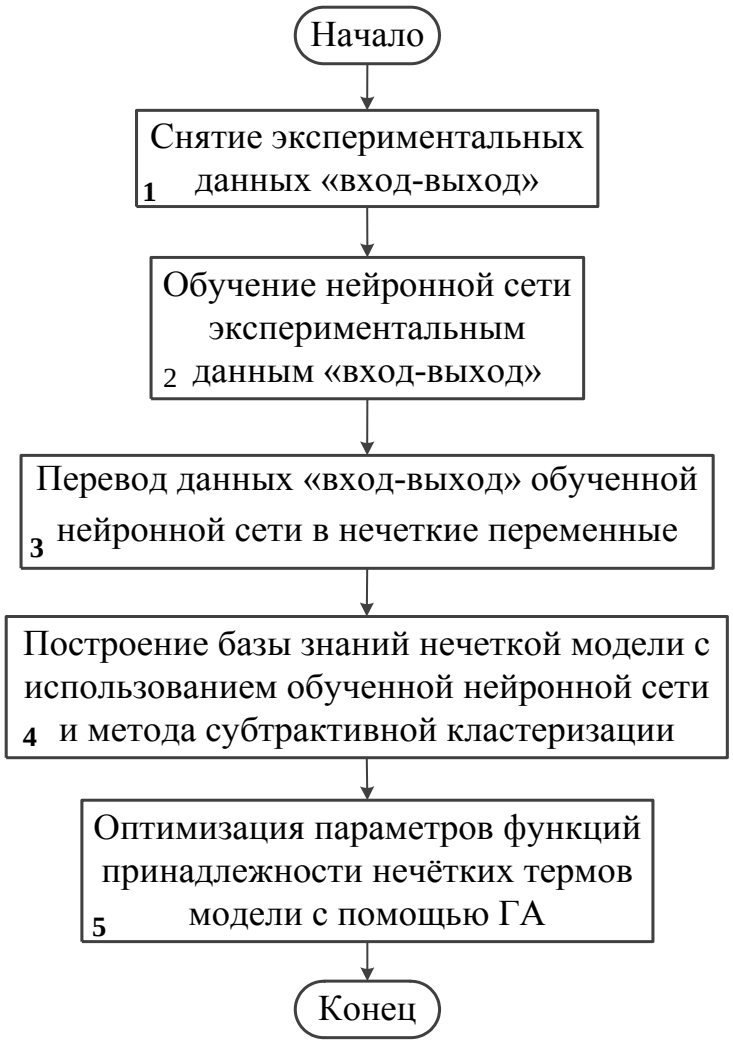


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма нечёткой нейросетевой идентификации

Оптимизация параметров функций принадлежности с использованием ГА направлена на минимизацию разницы между реакцией нечеткой модели и эталонными значениями:

$$J = \sum_{i=1}^{n}\left[\text{Def}(\mathbf{Y}_n, \mathbf{C}) - y_i\right]^2 \to \min, \tag{3}$$

где Def – применяемый оператор дефаззификации; $\mathbf{Y}_n$ – вектор значений выходной лингвистической переменной; n – общее количество строк в нечеткой базе знаний; $\mathbf{C}$ – вектор значений параметров функций принадлежности; y_i – значения выходных параметров экспериментальных данных при соответствующих входных воздействиях.

Представленный алгоритм построения модели был реализован в виде программы Fuzzy Logic Identification (FLI). Тестирование функциональности программы FLI проводилось на имитационных моделях ЭЭС и на физической установке (рис. 5), которая состояла из следующих элементов: синхронного генератора с обмоткой возбуждения; машины постоянного тока, имитирующей

турбину (Т); возбудителя; датчика частоты вращения (ДЧ); трансформатора напряжения (ТН); активно-индуктивной нагрузки. С использованием блоков библиотек Real-Time Windows Target и Simulink системы MATLAB выполнялось автоматическое управление физической установкой с помощью разработанных имитационных моделей АРВ и АРЧВ. Данные с физической установки позволили создать нечеткую модель с использованием 25 правил. В результате наблюдается высокая точность (среднеквадратичное отклонение (СКО) составило менее 0,008) и практическая применимость программы FLI для построения нечеткой модели.

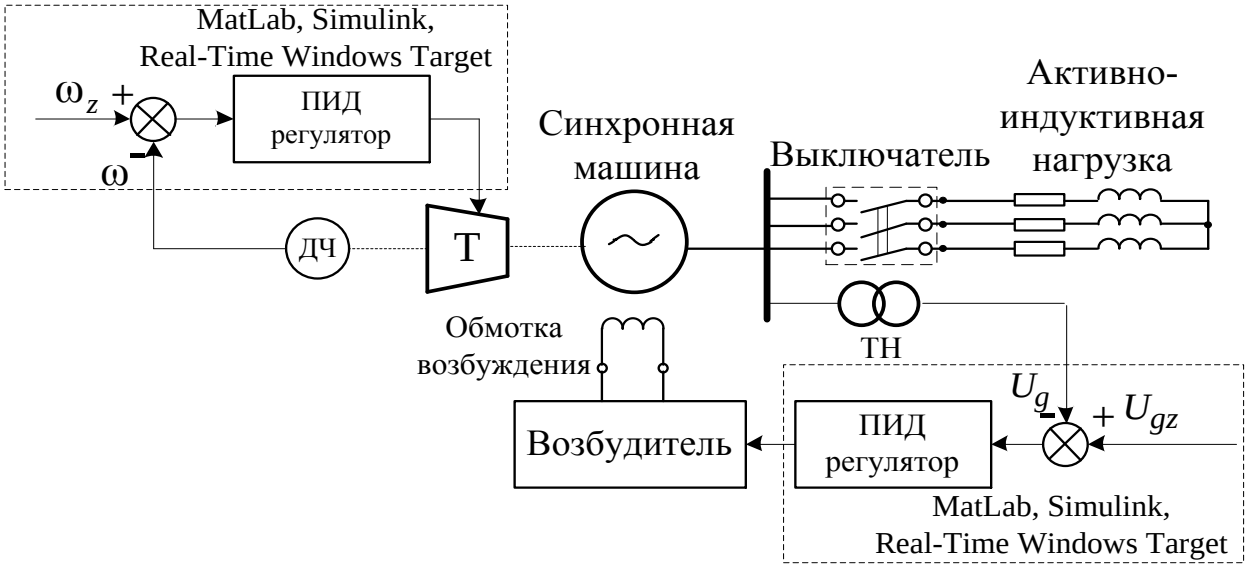


Рисунок 5 – Функциональная схема исследуемой физической установки

Исследования на имитационной и физической моделях ГУ показали высокую эффективность применения ИНС, СНЛВ и ГА для построения цифровых моделей по экспериментальным данным.

В третьей главе представлены исследования режимов работы ГУ объектов РГ в СЭС с низким качеством электроэнергии. В частности, исследована работа ГУ на базе синхронного генератора на нелинейную и несимметричную нагрузку. Рассмотрена возможность применения энергороутеров в СЭС с пониженным качеством электроэнергии. При этом исследованы установившиеся и переходные режимы электрических сетей с энергетическими роутерами, а также аварийные режимы. На имитационных моделях исследованы режимы совместной работы энергороутеров и НЭ в СЭС с зарядными станциями электромобилей.

Анализ результатов имитационного и физического моделирования работы синхронного генератора на нелинейную и несимметричную нагрузку позволил сделать следующие выводы:

1. Работа синхронного генератора на несимметричную нагрузку сопровождается появлением тока обратной последовательности. При этом генерируются в сеть высшие гармоники. Среднее значение тока возбуждения генератора остаётся практически неизменным, однако в обмотке возбуждения появляется ток частотой 100 Гц, амплитуда которого увеличивается пропорционально росту несимметрии нагрузки. Следовательно, необходимо

контролировать и ограничивать ток возбуждения и нагрузку генератора. Ограничение мощности генератора, работающего на несимметричную нагрузку, может быть установлено исходя из разности токов в фазах, которая не должна превышать определенного значения для данного типа генератора.

2. Имитационное моделирование выявило, что при увеличении гармонических искажений тока нагрузки значительно увеличиваются токи в статоре и роторе генератора. Например, при $k_{Ua} = 15,6\,\%$ среднеквадратичное значение тока статора повысилось на 32% по сравнению с режимом отсутствия выпрямительной нагрузки. При $k_{Ua} = 3,5\,\%$ среднее значение тока возбуждения выросло на 2,5% по сравнению с отсутствием выпрямительной нагрузки, а при $k_{Ua} = 15,6\,\%$ (при этом выпрямительная нагрузка составляла 25% от номинальной мощности генератора) – на 20%. Это явление связано с неправильной работой системы АРВ в таких условиях. Для устранения проблемы требуется внедрение фильтров гармоник в состав АРВ. По мере роста искажений увеличивается амплитуда вынужденных колебаний тока возбуждения генератора с частотой, кратной 300 Гц. Например, при коэффициенте гармоник напряжения $k_{Ua} = 15,6\,\%$ амплитуда вынужденных колебаний тока возбуждения составила 5% от основного сигнала.

3. Во время работы маломощного синхронного генератора одновременно на нелинейную и несимметричную нагрузку появляется ток обратной последовательности и высшие гармоники. При повышении нагрузки увеличивается амплитуда колебаний тока возбуждения генератора с частотами, кратными 100 и 300 Гц. Это вызывает механические колебания ротора генератора, что может привести к вибрациям, ускоренному износу и потере устойчивости. Для обеспечения возможности работы ГУ при наличии несимметрии и гармонических искажений необходимо принятие специальных мер: подключение ГУ через вставки постоянного тока (ВПТ); применение фильтров гармоник; использование автоматики ограничения мощности генератора; применение энергороутеров и др.

Перспективным направлением развития электрических сетей является применение в СЭС энергетических роутеров, построенных с использованием твердотельных высокочастотных (ВЧ) трансформаторов (рис.6).

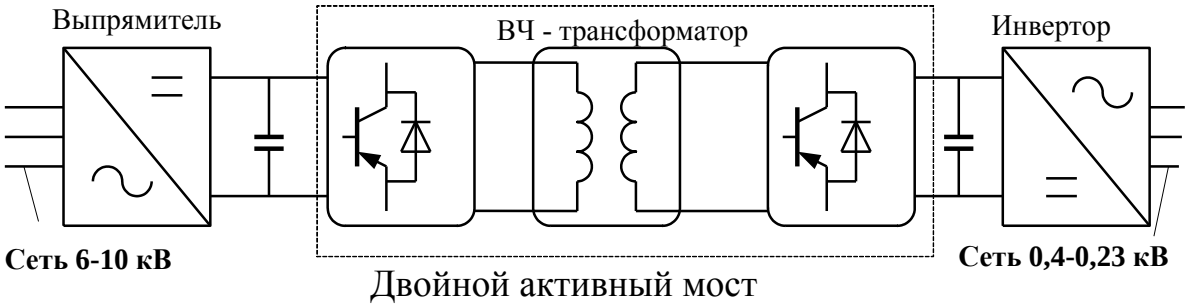


Рисунок 6 – Энергетический роутер на основе твердотельного трансформатора

Проведены исследования режимов на модели СЭС нетяговых потребителей с ГУ, подключенной через энергороутер (рис. 7). В данной СЭС в виду наличия

несимметричной и нелинейной тяговой нагрузки на шинах 10 кВ имеет место заметная несинусоидальность и несимметрия напряжения. При включении в СЭС энергороутера потребители получают электроэнергию высокого качества (табл. 1).

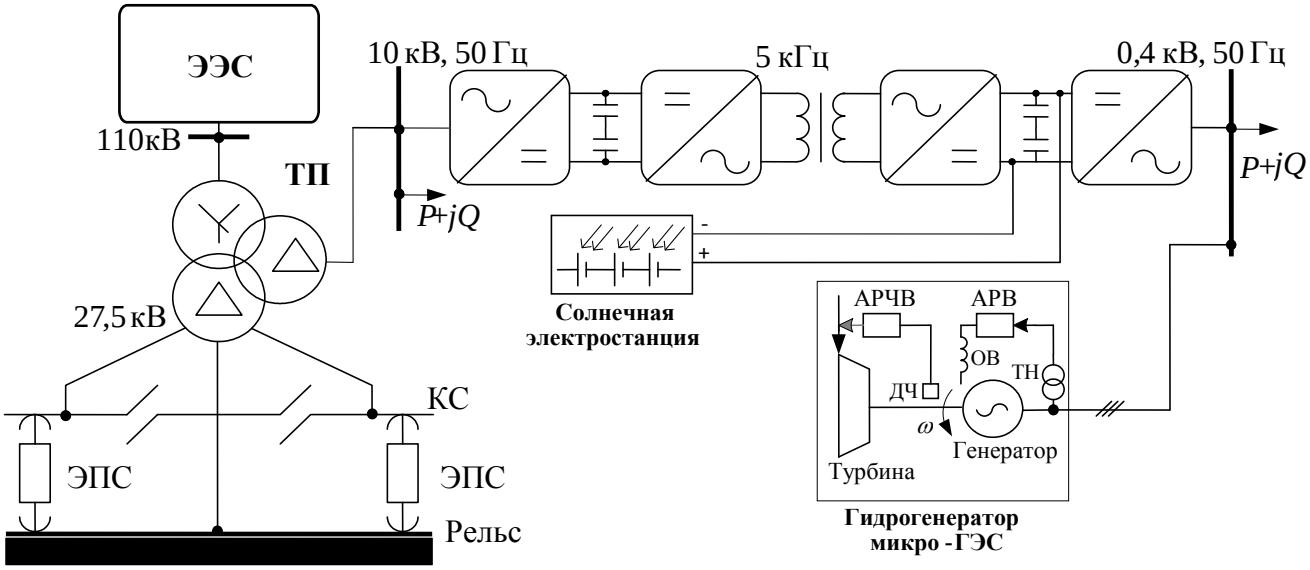


Рисунок 7 – Схема исследуемой СЭС

Таблица 1 – Коэффициенты гармоник и несимметрии напряжения, %

	Место измерения показателя	k_{Uab}	k_{Ubc}	k_{Uca}	k_{2U}
1	В сети 10 кВ	10,66	9,11	8,74	4,24
2	На шинах 0,4 кВ	0,09	0,09	0,09	0,05

Исходя из результатов имитационного моделирования аварийных режимов, можно сделать вывод, что энергороутер по сравнению с классическим трансформатором обеспечивает лучшее ограничение токов КЗ: токи однофазного КЗ уменьшаются в среднем на 11,3%; токи двухфазного КЗ – на 29,2%; токи трехфазного КЗ – на 28%.

Исследование эффективности применения энергороутера с НЭ было выполнено на имитационной модели схемы СЭС (рис.7) без ГЭС. Моделировался ВЧ трансформатор 10/0,4 кВ мощностью 3000 кВ·А. Нагрузка на стороне 0,4 кВ составляла $1 + j0{,}5$ МВА. Система управления подключала НЭ при снижении напряжения у потребителей и отключала в случае превышения его установленного значения. Исследовались провалы напряжения в сети 0,4 кВ при КЗ в высоковольтной сети для следующих ситуаций: 1 – СЭС без энергороутера и НЭ; 2 – СЭС на основе типового трансформатора с НЭ; 3 – СЭС с энергороутером без НЭ; 4 – СЭС с энергороутером и НЭ (цифры на рис.8). При длительном КЗ на стороне 10 кВ в случае использования энергороутера напряжение на шинах 0,4 кВ снижается до нуля не сразу, а через 5 с после КЗ (хар. 3 на рис. 8). Когда используется НЭ, напряжение у потребителей сохраняется на номинальном уровне (хар. 4 на рис. 8).

В настоящее время наблюдается интенсивный рост рынка электромобилей и развитие зарядной инфраструктуры, в том числе зарядных станций (ЗС) быстрой зарядки. Для реализации такого подхода в СЭС требуется установить специальные

ЗС с преобразовательными устройствами для регулирования уровня напряжения и снижения электромагнитных помех, что увеличивает нагрузку на электрическую сеть и может привести к ухудшению качества электроэнергии. Одним из способов решения возникающих проблем является применение вместе с ЗС генерирующих установок и НЭ. При этом энергороутеры могут существенно улучшить работу ЗС и обеспечить эффективное управление потоками мощности. Результаты имитационного моделирования показывают, что применение энергороутера позволяет улучшить качество электроэнергии и реализует возможность прямого подключения ГУ на основе ВИЭ и НЭ для питания ЗС, сглаживания графика нагрузок и повышения надежности электроснабжения потребителей.

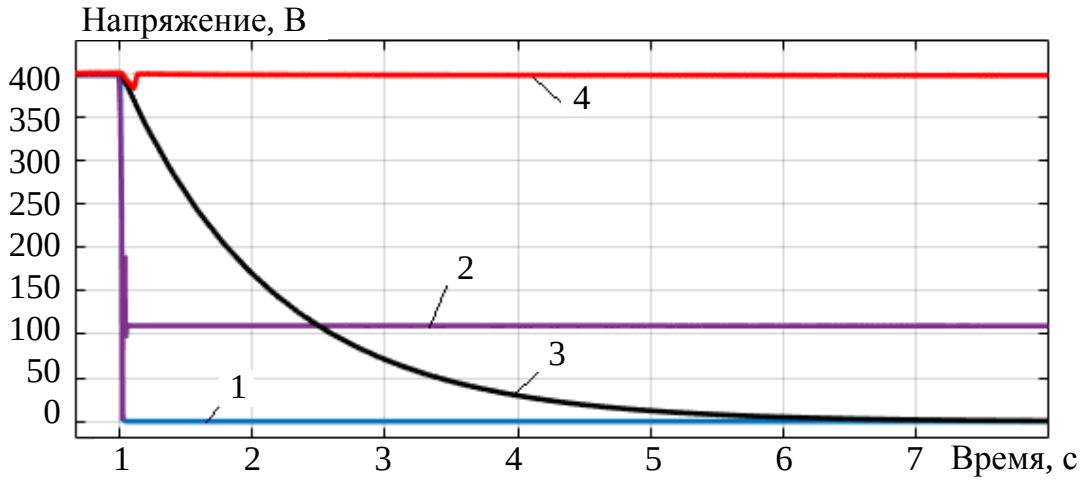


Рисунок 8 – Напряжение при трехфазном КЗ

В работе предлагается модифицированная модель регулятора напряжения выходного инвертора энергороутера для управления генератором сигналов широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Алгоритмы регулирования основаны на преобразовании трехфазной системы координат в синхронно вращающуюся систему координат d-q-0 и обратно. В блоке общего регулятора напряжения отдельно регулируются сигналы напряжения по осям d и q с использованием ПИД регуляторов. Для формирования сигналов напряжения по осям d и q, которые затем используются преобразователем систем координат, применяется следующий алгоритм:

$$U_{d_conv} = \left(U_{d_ref} - V_d\right) \cdot W_{pid} - I_q \cdot w \cdot L,$$

$$U_{q_conv} = \left(U_{q_ref} - V_q\right) \cdot W_{pid} + I_d \cdot w \cdot L,$$

где U_{d_ref} и U_{q_ref} – сигналы управления от регулятора напряжения цепи постоянного тока по осям d и q соответственно; U_{d_sis} и U_{q_sis} – сигналы управления от ПИД регуляторов по осям d и q, формируемые в соответствии с заданной уставкой и отрицательной обратной связью по текущему напряжению сети V_d и V_q; I_d и I_q – токи в электрической сети по осям d и q соответственно; w – угловая частота в сети; L – индуктивность выходного преобразователя энергороутера; W_{pid} – передаточная функция ПИД регулятора.

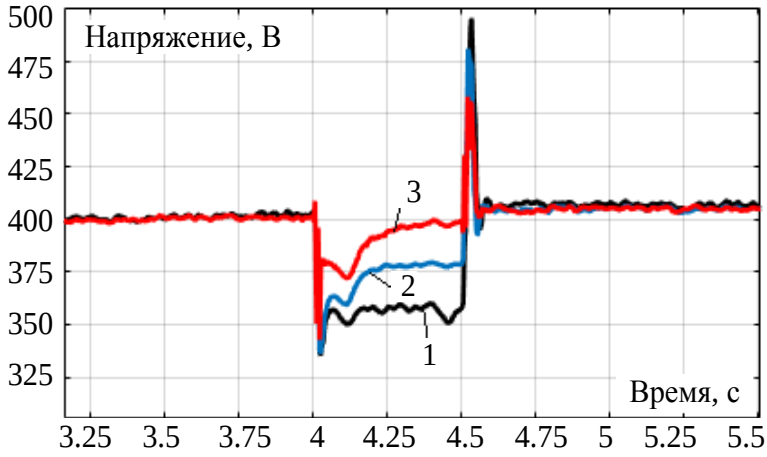


Рисунок 9 – Напряжение у потребителей при подключении мощной нагрузки

Использование регулятора напряжения инвертора энергороутера и при подключении к СЭС аккумуляторов (рис. 9, хар. 2) в рассматриваемом режиме включения дополнительной мощной нагрузки позволяют поддерживать напряжение у потребителя 0,4 кВ вблизи номинального значения в отличие от обычного силового трансформатора (рис. 9, хар. 1). При этом форсировка сигнала ПИД регулятора по оси q в алгоритме регулирования инвертора энергороутера обеспечивает быстрое повышение напряжения до номинального значения (рис. 9, хар. 3). Использование представленного регулятора напряжения энергороутера позволило улучшить качество электроэнергии, снизив амплитуды гармоник напряжения в сети потребителей переменного тока 0,4 кВ. Суммарный коэффициент гармоник THD при использовании предлагаемого регулятора энергороутера снизился в 1,7 раза.

В четвертой главе представлены методы настройки и интеллектуального управления регуляторами ГУ. Подробно рассмотрен метод согласованной настройки АРВ и АРЧВ синхронного генератора с применением ГА, реализованный в виде программы для ЭВМ. В продолжение метода представлена адаптивная система управления параметрами настройки АРВ и АРЧВ, основанная на искусственной нейронной сети и нечеткой логике. Описана разработанная программа адаптивной настройки АРЧВ генератора. Представлены результаты моделирования работы адаптивного блока настройки АРВ и АРЧВ синхронного генератора.

Генераторы малой мощности имеют малую постоянную инерции роторов. В связи с этим электрические и механические процессы становятся близки по времени. Поэтому согласованная настройка для регуляторов генераторов РГ является актуальной. Принцип согласованной настройки АРВ и АРЧВ заключается в определении таких коэффициентов настройки, которые обеспечивают минимальные отклонения напряжения и частоты вращения ротора генератора от номинальных значений с учетом связывающего канала регуляторов и диагональных связей генератора. В этом случае объект регулирования представляется двухсвязным, а многосвязный регулятор имеет диагональную связь по частоте (рис. 2). На рис. 10 представлена блок-схема алгоритма метода согласованной настройки АРВ и АРЧВ. Этот алгоритм включает в себя следующие этапы: идентификация модели ГУ; настройка АРВ и АРЧВ; оценка запаса устойчивости. На этапе идентификации модели составляется характеристический полином в соответствии с САР, представленной на рис. 2, по выражению (2).

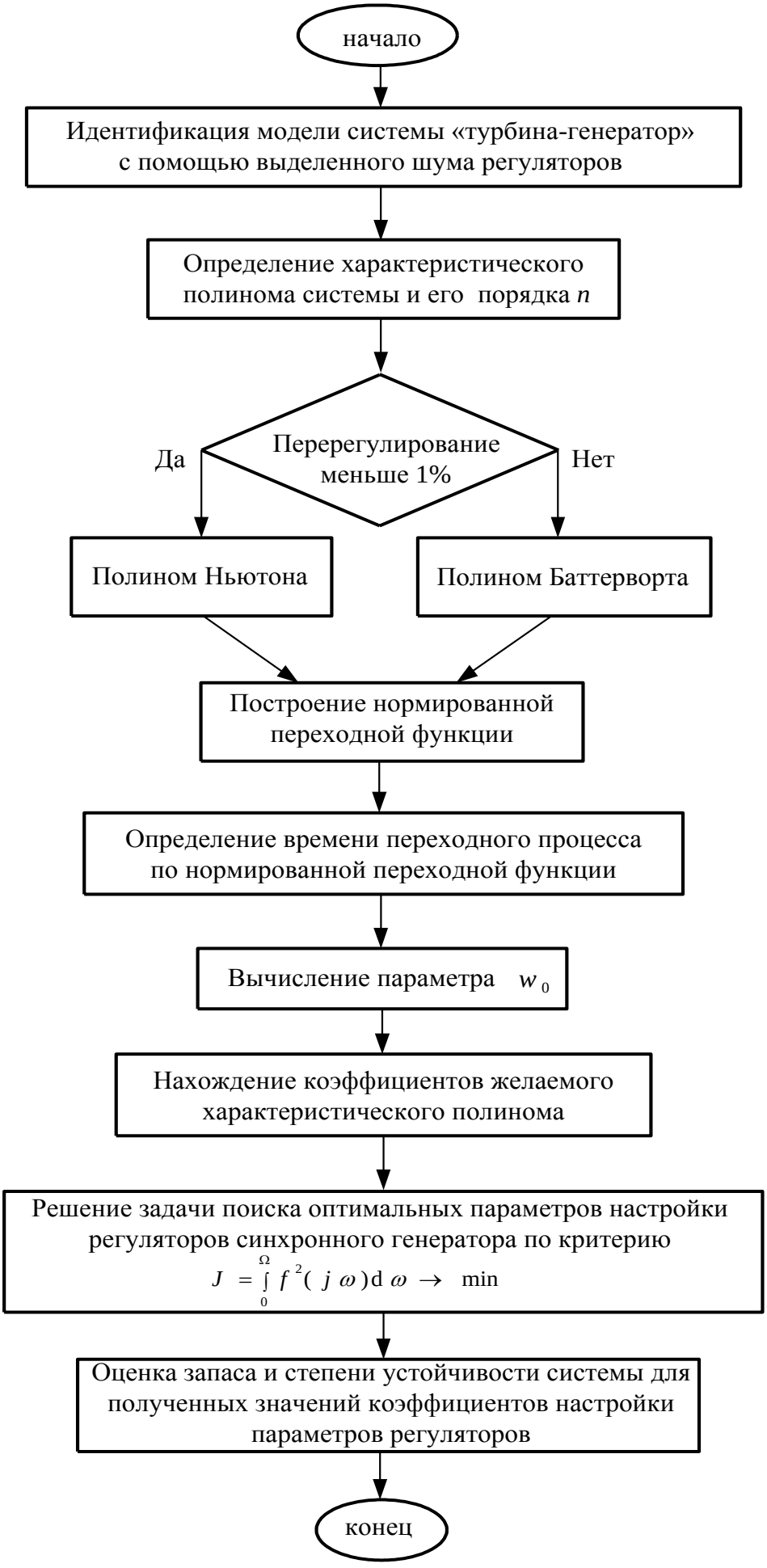


Рисунок 10 – Блок-схема алгоритма метода настройки АРВ и АРЧВ

В представленном алгоритме согласованной настройки выполняется оптимизация коэффициентов настройки АРВ и АРЧВ по следующему критерию:

$$J = \int_0^{\Omega} f^2\left(j\omega\right)\mathrm{d}\,\omega \to \min, \qquad (4)$$

где $f\left(j\omega\right) = D^{ж}\left(j\omega\right) - D^{м}\left(j\omega\right)$ – разность соответствующих коэффициентов желаемого (стандартного) полинома и характеристического полинома настраиваемой системы; ω – частота из диапазона «полосы пропускания» системы [0; Ω].

Для минимизации показателя (4) предлагается использовать генетический алгоритм. Исследования предложенного метода согласованной настройки АРВ и АРЧВ проводились на имитационной модели СЭС промышленного предприятия, в составе которой работали турбогенераторная установка (ТГУ) мощностью 3125 кВ·А и три дизель-генераторных установки (ДГУ) в условиях низкого качества электроэнергии. Оценка эффективности настройки регуляторов ТГУ выполнялась при переходе в островной (изолированный) режим работы в результате отключения источника питания 110 кВ. Результаты имитационного моделирования этого режима для механической мощности и напряжения представлены на рис.11 и 12. Цифры на графиках обозначают следующее: 1 – несогласованная настройка АРВ и АРЧВ; 2 – согласованная настройка регуляторов.



Рисунок 11 – Мощность на валу турбины: режим 1 – перерегулирование σ = 4,88%, время переходного процесса t_p = 3 с; режим 2 – σ = 2,44 %, t_p = 3 с

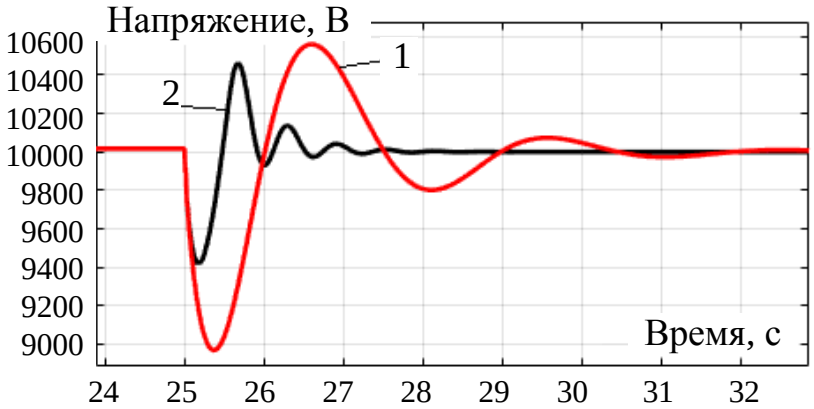


Рисунок 12 – Напряжение на шинах ТГУ при переходе в изолированный режим: 1 – σ = 10 %, t_p = 5 с; 2 – σ=6 %, t_p = 2 с

Сравнивая результаты имитационного моделирования, можно отметить, что согласованная настройка регуляторов уменьшает в 2 раза перерегулирование мощности турбины, а напряжения генератора – в 1,7 раза. При этом время переходного процесса для напряжения уменьшается в 2,5 раза. Таким образом, метод согласованной настройки АРВ и АРЧВ генератора позволяет улучшить показатели качества регулирования механических и электрических параметров.

В случае изменения режима работы требуется корректировка настроек АРВ и АРЧВ генератора. Для решения этой задачи предлагается использовать адаптивную систему управления на базе нейро-нечеткой сети и системы нечеткого логического вывода. Структурная схема предлагаемой системы управления показана на рис.13, принцип действия которой заключается в определении режима работы генератора и изменении коэффициентов настройки АРВ и АРЧВ в соответствии с текущим режимом.

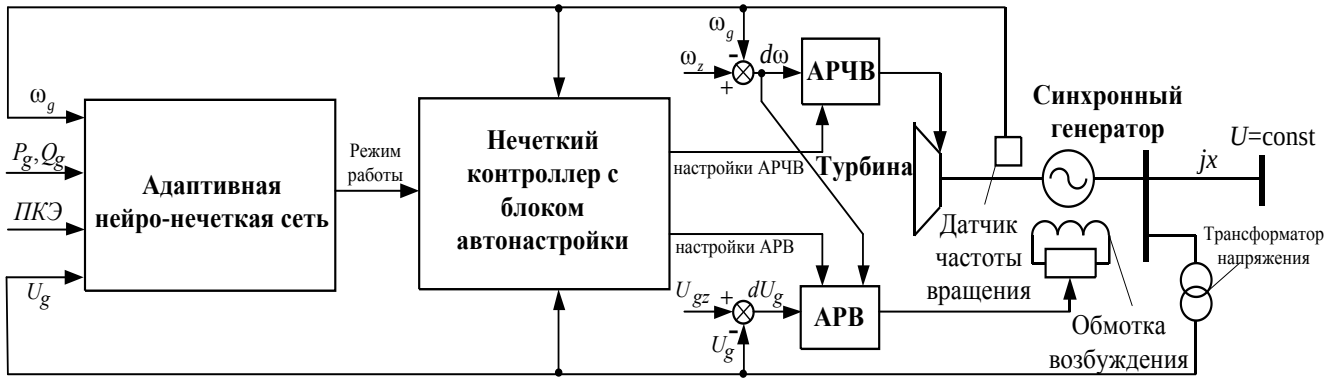


Рисунок 13 – Схема адаптивной системы управления настройками АРВ и АРЧВ ГУ

Для решения задачи определения режима работы генератора предлагается использовать обученную нейронную сеть на основе системы нечеткого вывода (ANFIS). Обучение целесообразно выполнять в 2 этапа для построения нечетких выходных моделей типа Сугэно:

1. На основе измеренных напряжения (U_g), частоте (ω_g), мощности (P_g, Q_g) и показателей качества электроэнергии (ПКЭ) в узле подключения установки РГ методом субтрактивной кластеризации определяются нечеткие правила.

2. По обученной нейронной сети определяются параметры нечеткой модели.

Схема нечеткого контроллера с блоком автонастройки представляет собой СНЛВ. На вход регулятора поступают данные о напряжении U_g и частоте вращения ротора генератора ω_g, а также о номере режима работы. На выходе контроллера получаются параметры настройки АРВ и АРЧВ для текущего режима. Испытание предложенной адаптивной системы проводилось на имитационной модели СЭС с низким качеством электроэнергии, схема которой показана на рис.14. Результаты моделирования показывают эффективность адаптивного блока управления настройками АРВ и АРЧВ. Соответствующие осциллограммы параметров ГУ представлены на рис. 15-17. На этих рисунках цифрами обозначено: 1 – без изменения параметров настройки регуляторов; 2 – с использованием fuzzy-регулятора с блоком автонастройки.

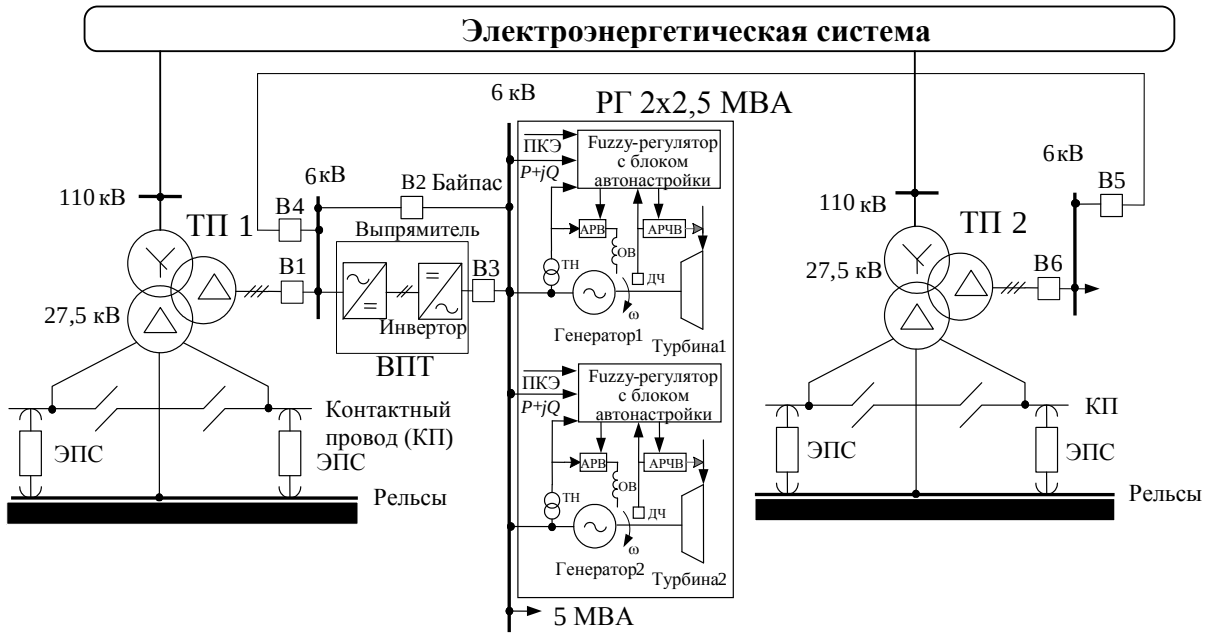


Рисунок 14 – Схема исследуемой СЭС

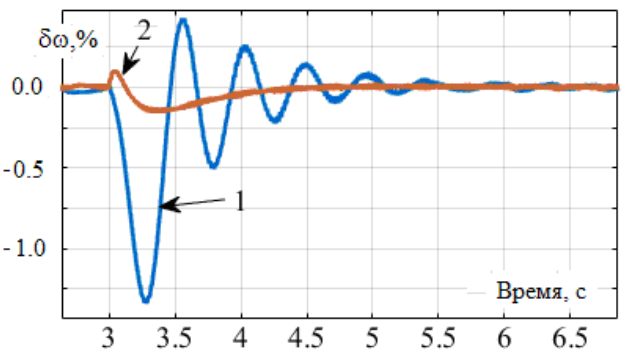


Рисунок 15 – Отклонение частоты при подключении дополнительной нагрузки

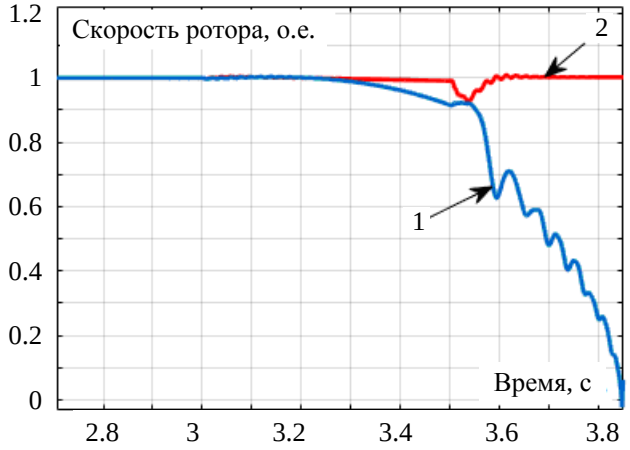
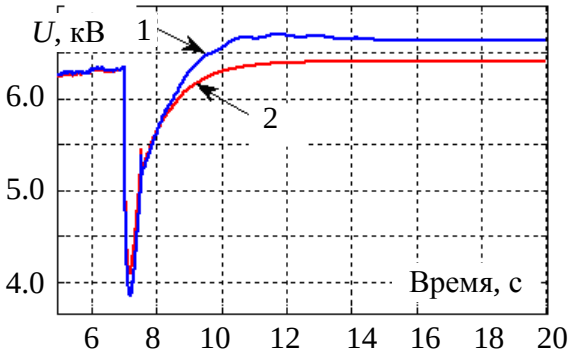
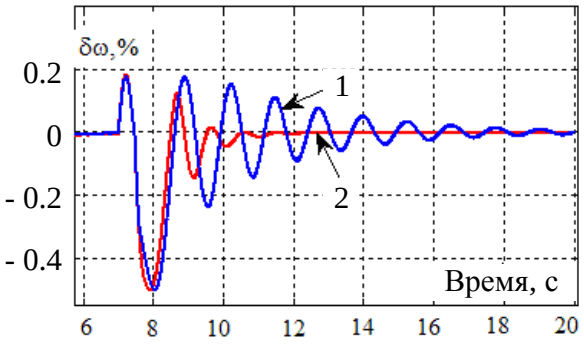


Рисунок 16 – Скорость ротора при КЗ на шинах 6 кВ длительностью 0,5 с



(а) напряжение



(б) отклонение частоты

Рисунок 17 – Параметры ГУ при отключении ВПТ и включении байпаса через 0,5 с

Таким образом, используемые интеллектуальные технологии в управлении регуляторами синхронного генератора с применением методики согласованной настройки позволили сформировать базу знаний адаптивной системы управления ГУ, эффективность которой заключается в улучшении показателей качества

регулирования. В рассматриваемом примере при подключении мощной нагрузки время переходного процесса для частоты вращения ротора уменьшается в 2,5 раза. Для решения задачи в области адаптивного управления системой АРЧВ генератора был разработан специализированный программный комплекс.

В пятой главе рассматривается применение в АРВ и АРЧВ инерционно-форсирующего звена с подстраивающимися параметрами при изменении режима работы ГУ. Такие регуляторы названы прогностическими. На этой основе разработаны и групповые прогностические регуляторы установок на базе синхронных генераторов. Представлены результаты исследования совместной работы ГУ с прогностическими регуляторами и накопителей в СЭС с пониженным качеством электроэнергии. Показана эффективность работы самонастраивающегося прогностического АРЧВ на физической модели ГУ. Рассмотрено влияние настройки прогностических регуляторов ГУ на качество электроэнергии в СЭС, а также возможность устранения фликера с помощью локальных согласованно настроенных и групповых прогностических АРВ и АРЧВ. В главе представлены результаты исследования устойчивости работы прогностических регуляторов при изменении времени прогноза в широких пределах, а также исследована эффективность предлагаемого самонастраивающегося прогностического АРЧВ для асинхронного генератора двойного питания (АГДП), работающего в условиях низкого качества электроэнергии.

Для прогностических регуляторов предполагается управление по прогнозу ошибки $\varepsilon(t + \tau_{np})$. Такой подход может быть реализован в АРВ и АРЧВ с помощью дополнительного форсирующего звена с передаточной функцией:

$$W_p(s) = T_p s + 1, \tag{5}$$

где T_p – постоянная времени форсирующего звена; s – оператор Лапласа.

Удобно использовать форсирующее звено вместе с инерционным звеном.

Постоянную времени инерционно-форсирующего звена (ИФЗ) АРВ и АРЧВ предлагается определять через период собственных колебаний ротора генератора:

$$T_p = \frac{1}{f_p} = \frac{2\pi}{\sqrt{P_{синхр} \cdot \frac{\omega_0}{T_{je}}}}, \tag{6}$$

где f_p – частота собственных колебаний в Гц; ω_0 – номинальная угловая частота вращения ротора генератора в рад/с; $P_{синхр} = \frac{\partial P}{\partial \delta} = \frac{E_q \cdot U_g}{X_d} \cdot \cos\delta$ – синхронизирующая мощность; T_{je} – эквивалентная постоянная механической инерции агрегата; E_q и U_g – ЭДС и напряжение генератора; X_d – индуктивное сопротивление генератора по продольной оси; δ – угол нагрузки генератора.

Проверка эффективности предлагаемых прогностических АРВ и АРЧВ проводилась на имитационной модели применительно к схеме СЭС с низким

качеством электроэнергии, в составе которой работали: турбогенератор мини-ТЭЦ, гидрогенератор микро-ГЭС, солнечная электростанция и ветрогенерирующая установка (ВГУ) с генератором постоянного тока. По результатам моделирования можно отметить, что использование ИФЗ в АРВ и АРЧВ позволяет вдвое снизить амплитуды колебаний и вдвое сократить время переходного процесса для частоты вращения ротора синхронного генератора при кратковременном КЗ (рис. 18). Результаты моделирования, выполненные при отключении основного питания СЭС, показывают, что применение ИФЗ поддерживает необходимую устойчивость генераторов мини-ТЭЦ и микро-ГЭС (рис. 19). Эти результаты были достигнуты без использования точной настройки коэффициентов АРВ и АРЧВ.

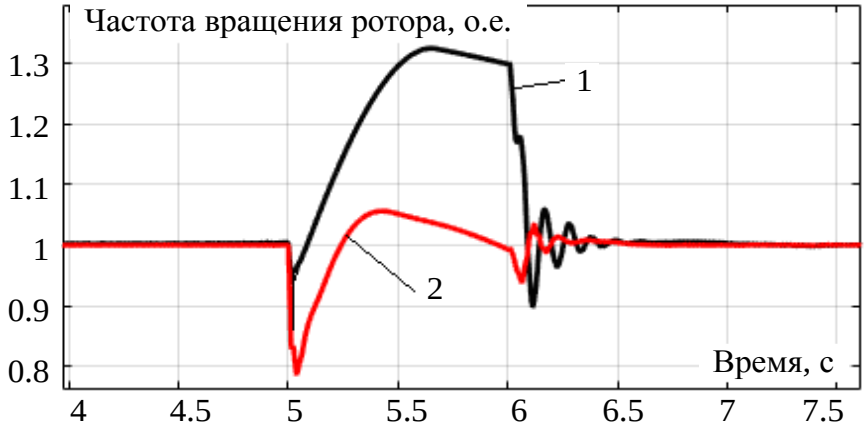
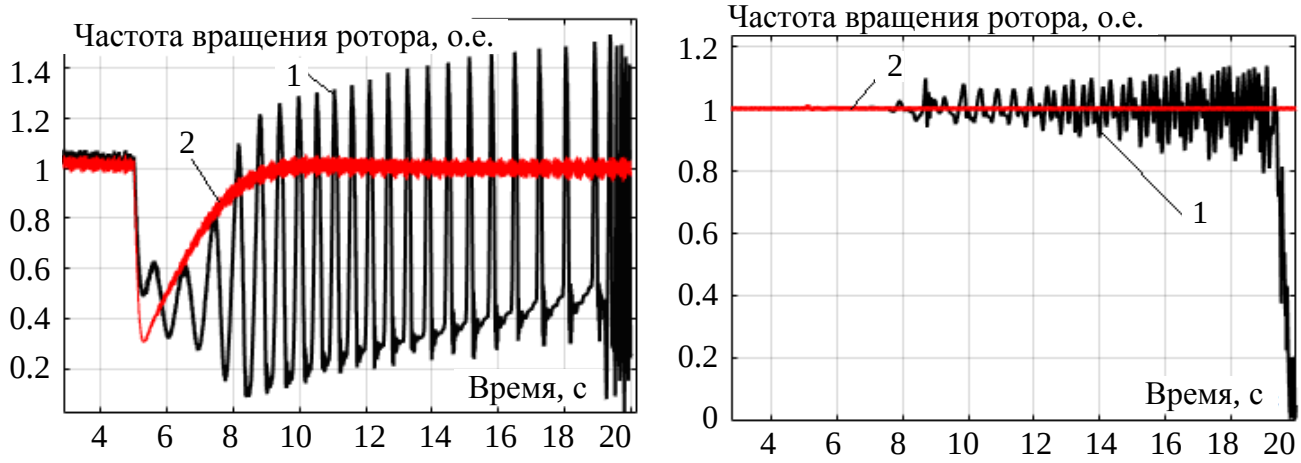


Рисунок 18 – Частота вращения ротора при КЗ: 1 – регуляторы без ИФЗ; 2 – в АРВ и АРЧВ применялись ИФЗ



(а) (б)

Рисунок 19 – Частота вращения ротора для турбогенератора (а) и гидрогенератора (б): 1 – регуляторы без ИФЗ; 2 – с использованием ИФЗ

Исследования показывают, что наибольший эффект достигается при использовании автоматической настройки постоянной времени ИФЗ в ситуации изменения режима работы ГУ. В частности, постоянные времени ИФЗ и стабильность системы значительно зависят от угла нагрузки синхронного генератора δ. Поэтому, полезно изменять постоянную времени ИФЗ в АРВ и АРЧВ при изменении условий нагрузки на синхронный генератор. Структура САР

напряжения и частоты с помощью самонастраивающихся прогностических АРВ и АРЧВ (СПАРВ и СПАРЧВ) показана на рис.20. На рисунке обозначены звенья со следующими передаточными функциями: W_G – генератора; W_E – возбудителя; W_T – турбины; W_{AVR} – АРВ; W_{ASR} – АРЧВ; W_p – ИФЗ. При изменении нагрузочного режима генератора САР автоматически рассчитывает постоянные времени ИФЗ для АРВ и АРЧВ. На рис.21 представлена схема имитационной модели СПАРЧВ турбогенератора, где ИФЗ разделено на два параллельно соединенных звена с выделением изменяющейся постоянной времени.

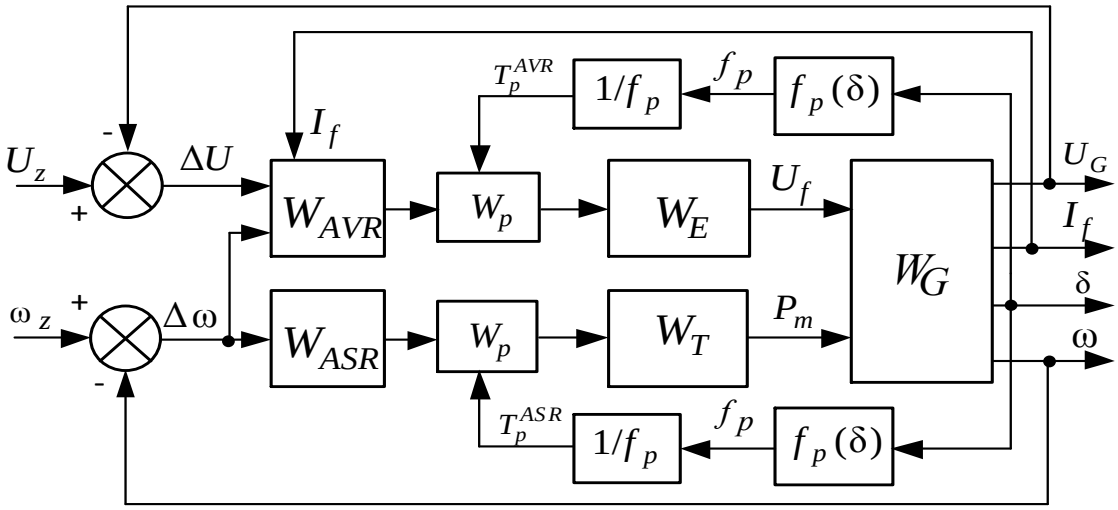


Рисунок 20 – Структурная схема САР генератора с самонастраивающимися прогностическими АРВ и АРЧВ

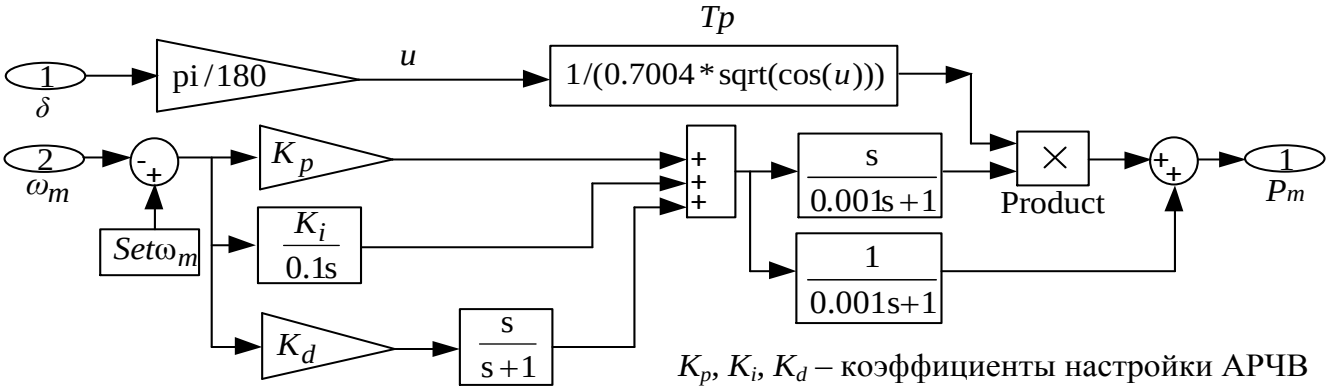


Рисунок 21 – Схема модели СПАРЧВ в MATLAB-Simulink

Результаты имитационного моделирования показывают, что применение СПАРВ и СПАРЧВ значительно улучшает качество регулирования параметров ГУ объектов РГ в СЭС при переходном процессе (табл. 2).

Исследование работы СПАРВ и СПАРЧВ проводилась и на физической модели ГУ, схема которой показана на рис. 5. По результатам моделирования можно отметить, что СПАРЧВ эффективнее работает по сравнению с типовым ПИД регулятором в нормальных и аварийных режимах. Главный эффект при этом заключается в улучшении показателей качества процесса регулирования. Например, в режиме кратковременного трёхфазного КЗ использование СПАРЧВ по сравнению с регуляторами без ИФЗ дало следующие преимущества: время переходного процесса для напряжения уменьшилось в 1,8 раза; уровень провала

напряжения уменьшился в 1,3 раза; перерегулирование частоты вращения ротора генератора снизилось в 2,6 раза. Применение СПАРВ и СПАРЧВ дополнительно позволило уменьшить время переходного процесса для напряжения в 2,2 раза, а также снизить амплитуды и количество колебаний напряжения и частоты вращения ротора генератора.

Таблица 2 – Показатели качества регулирования АРВ и АРЧВ

Параметр, определяющий качество регулирования	Тип регуляторов		Улучшение показателя, %
	АРВ и АРЧВ без ИФЗ	СПАРВ и СПАРЧВ	
1. Время переходного процесса частоты вращения ротора турбогенератора, с	12	4	67
2. Перерегулирование частоты вращения ротора турбогенератора σ, %	0,25	0	100
3. Степень затухания колебаний частоты вращения ротора турбогенератора μ, о.е.	0,61	1	39
4. Время переходного процесса напряжения турбогенератора, с	5	3	40
5. Перерегулирование напряжения турбогенератора σ, %	2,5	0	100
6. Степень затухания колебаний напряжения турбогенератора μ, о.е.	0,02	1	98

Также проводились исследования на имитационной модели СЭС по влиянию согласованной настройки прогностических АРВ и АРЧВ ГУ на качество электроэнергии. Результаты моделирования показали, что использование в СЭС объектов РГ позволяет повысить качество электроэнергии в части несимметрии и несинусоидальности напряжения. Согласованная настройка АРВ и АРЧВ генераторов позволяет улучшить ПКЭ. Например, значение коэффициента гармоник напряжения снижается на 7 %. Применение согласованно настроенных СПАРВ и СПАРЧВ значительно улучшает качество управления напряжением и частотой ГУ, обеспечивая быстрое восстановление стабильности после отключения питания.

В ЭЭС (СЭС) со множеством ГУ объектов РГ возникает проблема их регулирования и оптимизации настроек большого количества локальных регуляторов. Кроме этого, возникают задачи группового регулирования агрегатов объектов РГ. Для этой цели могут использоваться регуляторы с ИФЗ. На рис.22 представлена структурная схема группового регулирования однотипных агрегатов, основанная на принципе ведущего генератора. В этой схеме выделяются два ключевых компонента: групповой прогностический автоматический регулятор частоты вращения (ГПАРЧВ); групповой прогностический автоматический регулятор напряжения (ГПАРН). Схема имитационной модели ГПАРЧВ показана на рис. 23. Инерционно-форсирующие звенья в ГПАРЧВ и ГПАРН учитывались отдельно для генераторов, а блоки определения постоянной времени имели общую связь по углу нагрузки δ.

Также были проведены исследования влияния прогностических алгоритмов управления группой генераторов малой ГЭС на показатели качества

электроэнергии и параметры, характеризующие процесс управления при возмущениях в СЭС.

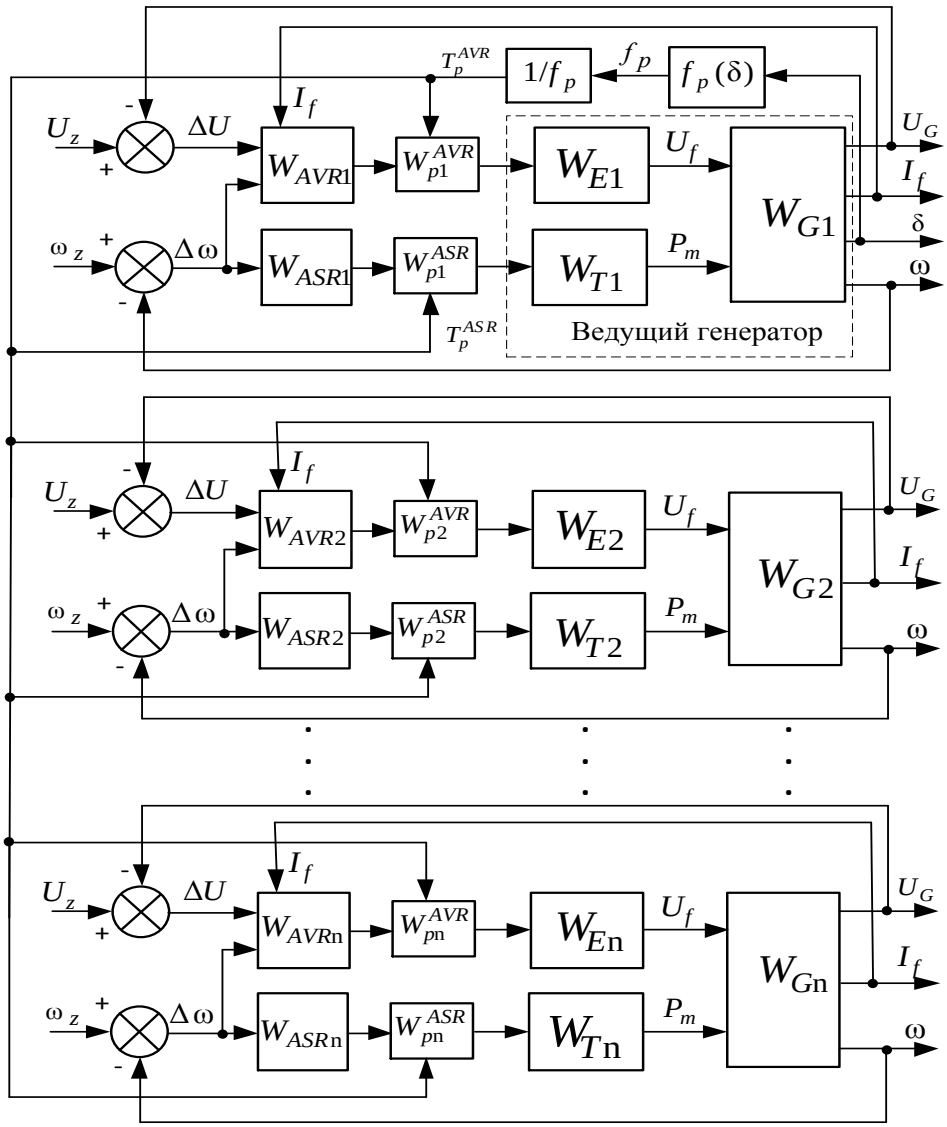


Рисунок 22 – Структурная схема группового регулирования напряжения и частоты

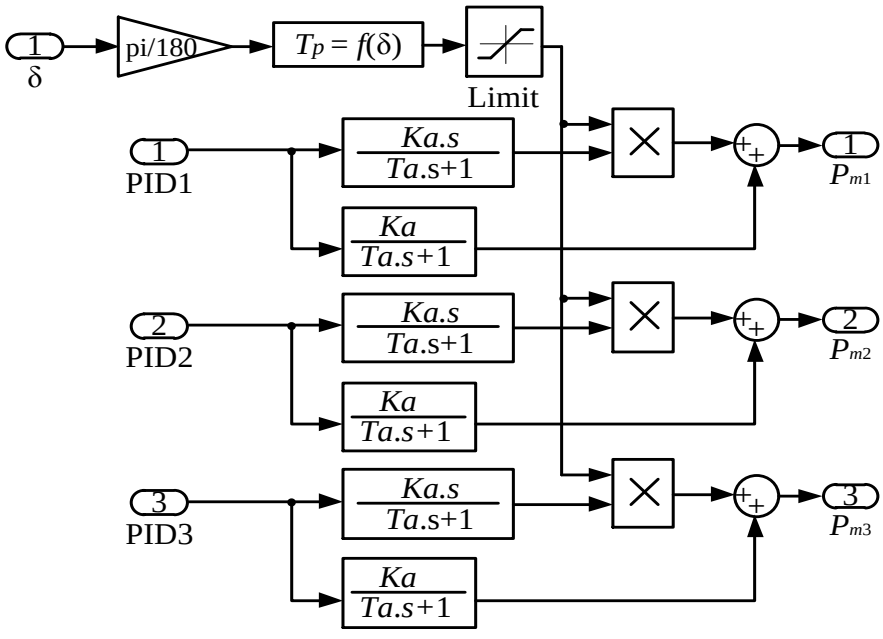
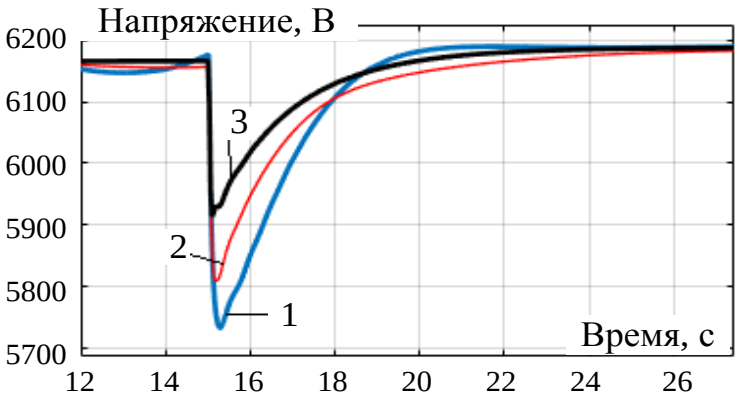
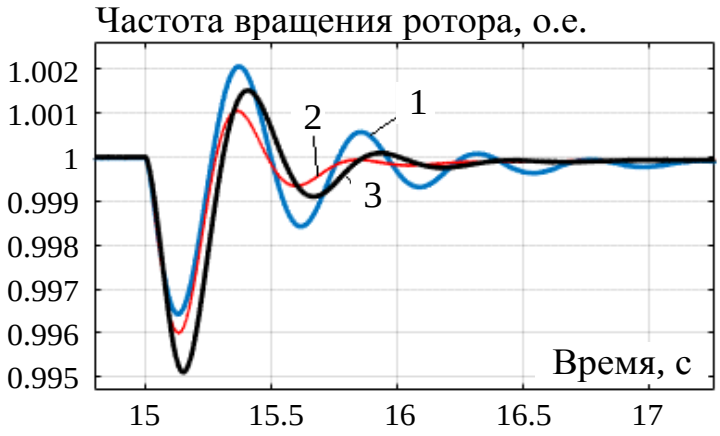


Рисунок 23 – Схема имитационной модели ГПАРЧВ



(а)



(б)

Рисунок 24 – Напряжение (а) и частота вращения ротора (б):
1 – использование локальных АРВ и АРЧВ без ИФЗ; 2 – локальные прогностические АРВ и АРЧВ; 3 – ГПАРН и ГПАРЧВ

Обобщая результаты, можно отметить высокую эффективность применения групповых прогностических регуляторов для генераторов, заключающейся в улучшении качества электроэнергии и показателей качества процесса регулирования напряжения и частоты во всех рассмотренных режимах работы. Например, в режиме подключения мощной тяговой нагрузки использование прогностических регуляторов позволяет снизить глубину провала напряжения в 1,7 раза, уменьшить время переходного процесса для частоты (рис.24), а также снизить в 4 раза коэффициент несимметрии напряжения k_{2U} по сравнению с использованием обычных АРВ и АРЧВ генераторов.

Далее были проведены исследования режимов работы СЭС с тремя турбогенераторами малой мощности, где возможно появление фликера. При этом для регулирования у турбогенераторов применялись групповые прогностические регуляторы напряжения и частоты. Результаты моделирования показывают, что изменение постоянной времени ИФЗ для отдельных турбогенераторов и несогласованная настройка регуляторов приводят к появлению фликера даже при отсутствии дополнительной нагрузки. Использование ГПАРЧВ позволяет предотвратить возникновение фликера при несогласованной настройке АРВ и АРЧВ.

Выполнены исследования влияния изменения постоянной времени ИФЗ в широких пределах на работу САР ГУ. Для проверки на устойчивость помимо изменения постоянной времени ИФЗ рассматривалось последующее возмущение в виде кратковременного (длительностью 0,3 с) трехфазного КЗ. Выводы по результатам имитационного моделирования следующие:

1. Увеличение постоянной времени ИФЗ АРЧВ автономно работающего генератора не приводит к потере устойчивости даже при последующем КЗ. При нулевом значении постоянной времени ИФЗ АРЧВ турбогенератора ухудшаются показатели качества регулирования напряжения и частоты (рис.25). Работа СПАРЧВ с отрицательной постоянной времени ИФЗ нежелательна, так как она может привести к потере устойчивости турбогенератора (рис.25, хар. 5 и 6).

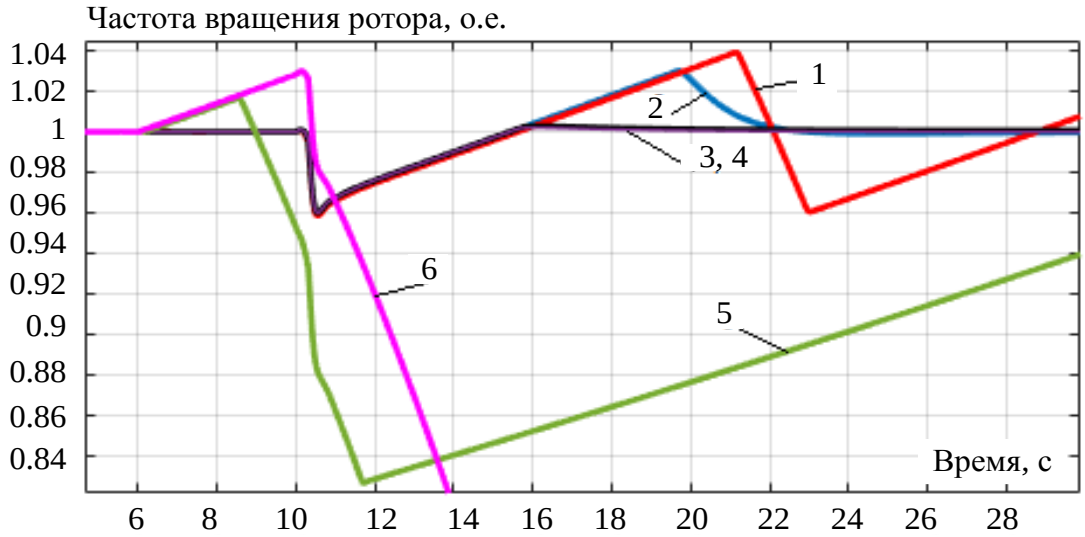


Рисунок 25 – Частота вращения ротора при КЗ и изменении постоянной времени ИФЗ: 1 – постоянная времени T_p=0; 2 – T_p рассчитывается автоматически и не изменяется; 3 – T_p увеличена в 100 раз; 4 – T_p увеличена в 10^6 раз; 5 – T_p умножена на -1; 6 – T_p умножена на -100

2. Изменение постоянной времени ИФЗ регулятора частоты одного гидрогенератора не привело к потере устойчивости. Тем не менее, установка нулевого или отрицательного значения T_p привела к снижению качества регулирования напряжения и частоты (рис.26).

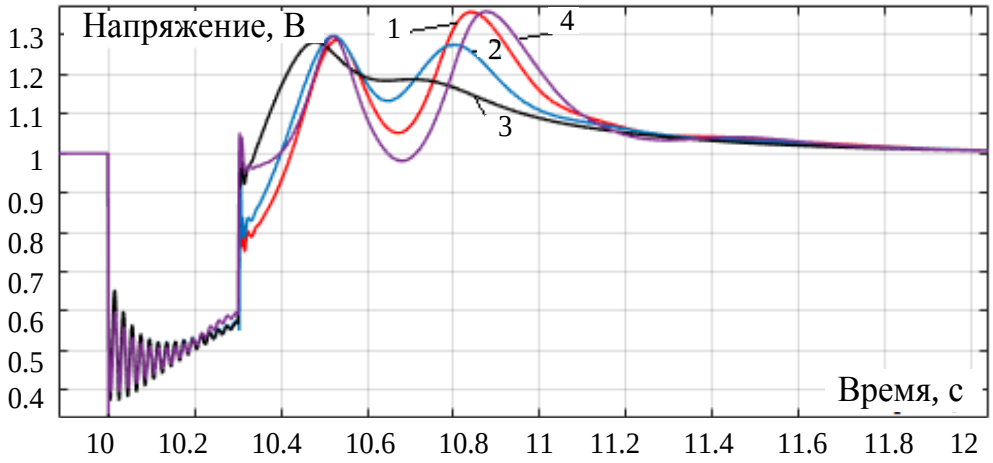
3. Оптимизация регулирования достигается путем увеличения постоянной времени ИФЗ в n раз, где n – количество параллельно работающих агрегатов.

4. Одновременное изменение постоянных времени ИФЗ АРЧВ отдельных гидрогенераторов приводит к низкочастотным колебаниям всех параметров. Таким образом, аппаратное ограничение постоянной времени ИФЗ АРЧВ, исключающее отрицательные значения, позволит снизить негативные последствия для генераторов, приводящие к потере устойчивости.

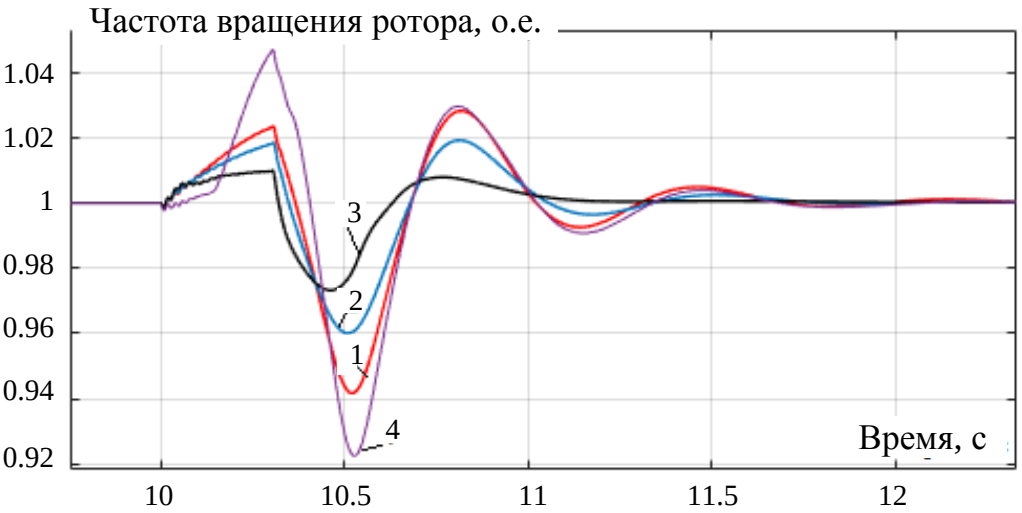
Аналогичные результаты были получены и для групповых прогностических регуляторов при изменении постоянной времени ИФЗ в широких пределах.

В ГУ объектов РГ могут использоваться синхронные, асинхронные и асинхронизированные генераторы. Последние относятся к машинам двойного

питания. Учитывая положительные свойства асинхронизированного генератора, заключающиеся в повышенной динамической устойчивости, большом диапазоне регулирования реактивной мощности, получении стабильных значений частоты генерируемого напряжения, их применение в ГУ объектов РГ является целесообразным. Однако это требует разработки эффективных САР.



(а)



(б)

Рисунок 26 – Напряжение (а) и частота вращения ротора (б) гидрогенератора: 1 – T_p=0; 2 – T_p рассчитывается автоматически и не изменяется; 3 – T_p увеличена в n раз, где n – число параллельно работающих генераторов; 4 – T_p умножена на -100

Альтернативой асинхронизированному генератору может быть асинхронный генератор двойного питания (АГДП) на базе асинхронной машины с фазным ротором. В работе представлены результаты исследований, показывающие эффективность применения для управления АГДП прогностических регуляторов, в том числе при работе в ЭЭС с низким качеством электроэнергии.

У АГДП возникает необходимость обеспечивать устойчивость по скорости. С ее изменением увеличивается скольжение и асинхронный момент. При значениях скольжения, больших критического, у АГДП устойчивость будет нарушаться. Поскольку предельное значение скольжения в аварийном режиме

определяет текущее значение ω, то постоянную времени прогнозирующего звена $T_{\text{пр}}$ предлагается рассчитывать как обратную величину текущего скольжения в герцах. С учетом этого была составлена структурная схема самонастраивающегося прогностического АРЧВ АГДП, представленная на рис.27.

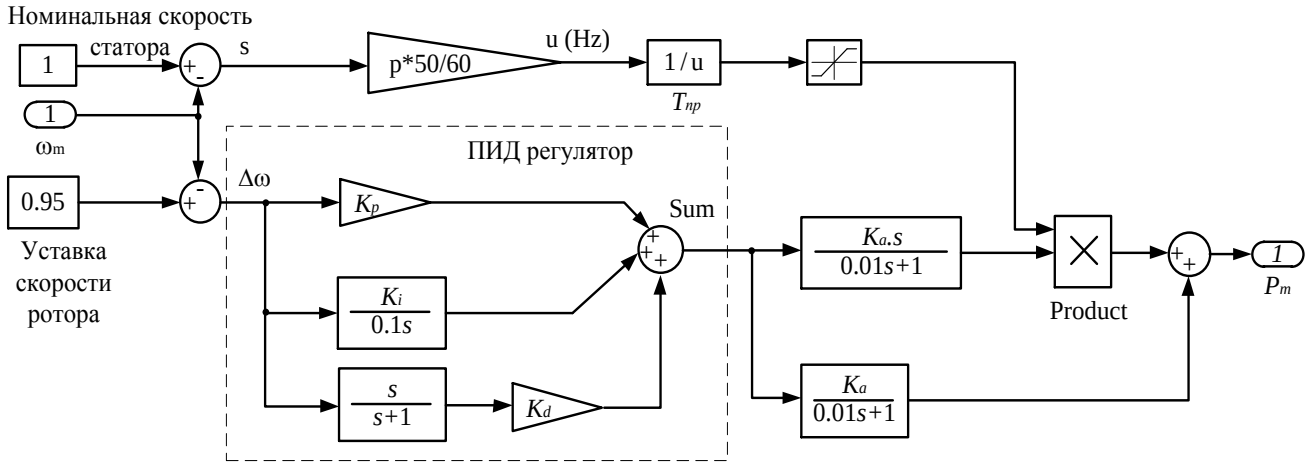


Рисунок 27 – Схема самонастраивающегося прогностического АРЧВ для АГДП

Исследования проводились также на модели СЭС нетяговых потребителей с малой ГЭС на основе двух АГДП. Результаты моделирования показывают эффективность предлагаемого СПАРЧВ, заключающаяся в улучшении показателей качества регулирования. Например, в режиме кратковременного удаленного КЗ по сравнению с обычными АРЧВ использование СПАРЧВ позволило: на 33,3% уменьшить время переходного процесса скорости ротора АГДП и частоты в сети; на 42,1% снизить перерегулирование скорости ротора АГДП и на 28,6% перерегулирование частоты; на 56% улучшить степень затухания колебаний скорости ротора АГДП и на 52% частоты в сети. При использовании СПАРЧВ уменьшается провал и перерегулирование напряжения у потребителей.

В шестой главе приводятся различные формы записи уравнений предельных режимов, использование которых позволяет определить области статической апериодической устойчивости (САУ) режима ЭЭС. При этом в составе ЭЭС рассматриваются ГУ объектов РГ. Рассмотрены методы ввода режима ЭЭС в область устойчивости, а также метод определения запаса устойчивости, на основе которых предлагается способ противоаварийного управления ГУ, оснащенных нечеткой системой управления настройкой регуляторов или прогностическими АРВ и АРЧВ.

Использование РГ в ЭЭС (особенно на базе ВИЭ) может приводить к «сужению» областей САУ и оказывает большое влияние на системы противоаварийного управления (ПАУ). Поэтому необходимо проводить расчеты областей САУ ЭЭС при подключении РГ и развивать методы и системы ПАУ. Подход, основанный на уравнениях предельных режимов (УПР), не требует многошаговых вычислительных процедур и обеспечивает надежность получения результата вследствие невырожденности матрицы Якоби в точке решения.

Выполнено определение областей САУ на основе УПР (7) для электрической сети, представленной на рис. 28. Мощности РГ приняты равными 24 МВт. Расчеты выполнялись для трех вариантов: все ЛЭП включены; ЛЭП между объектами РГ1 и РГ2 отключена; ЛЭП между РГ1 и подстанцией ЭЭС отключена. В исследованиях используется следующая система УПР:

$$\left.\begin{aligned} &\mathbf{F}\left[\mathbf{X},\mathbf{Y}(T)\right]=\mathbf{0};\\ &\mathbf{V}\left[\mathbf{X},\mathbf{R},\mathbf{Y}(T)\right]=\left(\frac{\partial\mathbf{F}}{\partial\mathbf{X}}\right)^{\mathrm{T}}\mathbf{R}=\mathbf{0};\\ &U(\mathbf{R})=\mathbf{R}^{\mathrm{T}}\mathbf{R}-1=0. \end{aligned}\right\} \qquad (7)$$

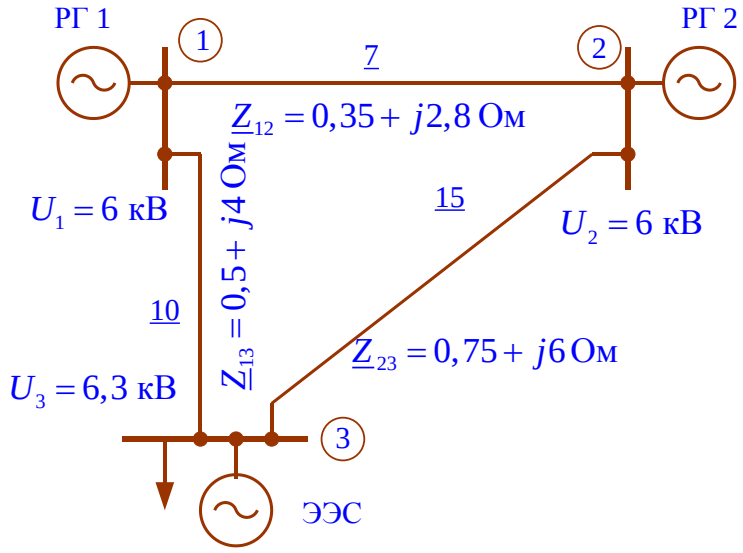


Рисунок 28 – Схема исследуемой электрической сети

Использование построенных с помощью УПР областей САУ (рис. 29) позволяет определить запас устойчивости ЭЭС, как близость точки режима к предельной гиперповерхности.

Запас устойчивости предлагается определять на основе УПР через евклидову норму вектора **K**:

$$\mathfrak{I}=\left(\mathbf{K}^{T}\mathbf{K}\right)^{\frac{1}{2}}=\left(\sum_{i=1}^{m}k_i^{2}\right)^{\frac{1}{2}}=\left(\sum_{i=1}^{m}\mu_i^{2}\left(y_{iL}-y_{i0}\right)^{2}\right)^{\frac{1}{2}},\qquad \mu_i=\frac{1}{k_{iH}\,y_{iHOM}}. \qquad (8)$$

В целом запас устойчивости определяется расстоянием от точки $\mathbf{Y}_0$ до гиперповерхности L_F (рис. 29), используя модифицированные УПР:

$$\left.\begin{aligned} &\mathbf{F}\left(\mathbf{X},\mathbf{Y}_0-\mathbf{M}^{-2}\left(\frac{\partial\mathbf{F}}{\partial D\mathbf{Y}}\right)^{\mathrm{T}}\mathbf{R}\right)=\mathbf{0}.\\ &\left(\frac{\partial\mathbf{F}}{\partial\mathbf{X}}\right)^{\mathrm{T}}\mathbf{R}=\mathbf{0}. \end{aligned}\right\} \qquad (9)$$

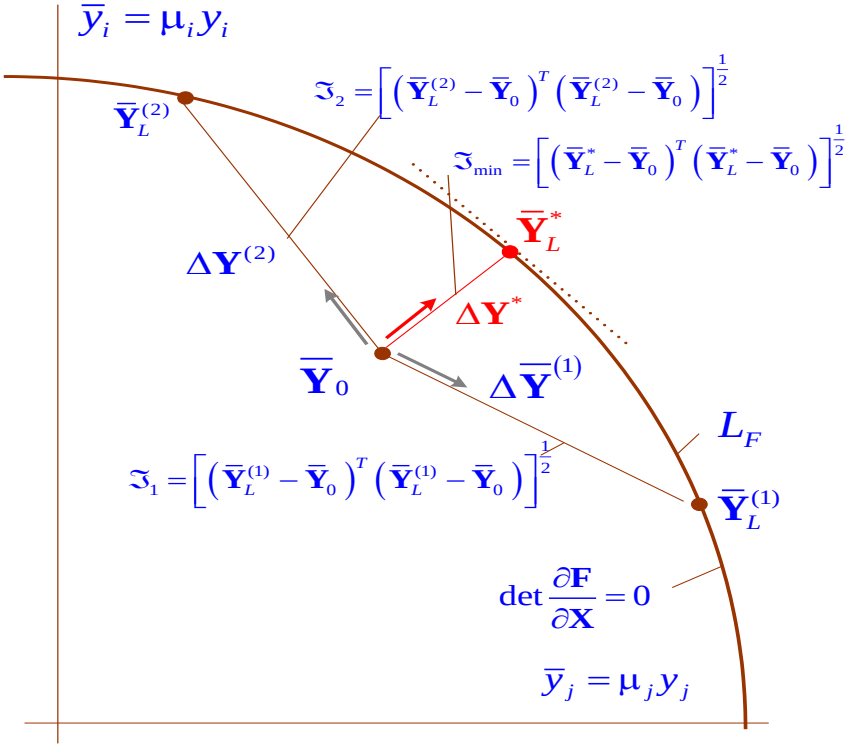


Рисунок 29 – К расчету запаса устойчивости

При включении в систему уравнений (9) условия ненулевого значения вектора **R** в точке решения можно преодолеть затруднения с наличием тривиального решения. Условие можно ввести дополнительной переменной α и показать систему УПР в следующем виде:

$$\begin{aligned} &\mathbf{F}\left[\mathbf{X}, \mathbf{Y}_0 - \mathbf{M}^{-2} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial D\mathbf{Y}} \right)^{\mathrm{T}} \mathbf{R}(1+\alpha) \right] = 0; \\ &\mathbf{V}(\mathbf{X}, \mathbf{R}) = \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} \right)^{\mathrm{T}} \mathbf{R} = \mathbf{0}; \\ &U(\mathbf{R}) = \mathbf{R}^{\mathrm{T}} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial D\mathbf{Y}} \right) \mathbf{M}^{-2} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial D\mathbf{Y}} \right)^{\mathrm{T}} \mathbf{R} - \Im_1^{\,2} = 0, \end{aligned} \tag{10}$$

где $\Im_1 \neq 0$ – фиктивная величина запаса.

После окончания итерационного процесса величину запаса устойчивости можно определить по формуле:

$$\Im = (1+\alpha) \sqrt{\mathbf{R}^{\mathrm{T}} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial D\mathbf{Y}} \right) \mathbf{M}^{-2} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial D\mathbf{Y}} \right)^{\mathrm{T}} \mathbf{R}} .$$

Обеспечение устойчивости послеаварийных режимов является важной задачей. Управляющие воздействия в этом случае формируются для ввода послеаварийного режима в область САУ по некоторой траектории $D\mathbf{Y}$ в пространстве регулируемых параметров **Y**; при этом автоматические регуляторы обеспечивают динамическую устойчивость и качественный переходный процесс. В аварийном режиме работы ЭЭС, например, когда отключается ЛЭП, область

устойчивости «сужается» и необходим ввод режима в ее границы. В работе рассматриваются следующие способы: 1. ввод режима в область устойчивости по заданным траекториям; 2. ввод режима в область устойчивости по кратчайшей траектории. При этом существует проблема выхода на «дальнюю границу» области устойчивости и получение решения, не приемлемого на практике. Эффективный метод решения задачи может быть реализован на основе алгоритма минимизации функции невязки уравнений установившегося режима (УУР):

$$\aleph(\mathbf{X}) = \mathbf{F}^{\mathrm{T}}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}_0) \cdot \mathbf{F}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}_0). \qquad (11)$$

Начальное значение параметра $\mathbf{Y}_0$ необходимо задавать так, чтобы точка исходного режима лежала за пределами области устойчивости.

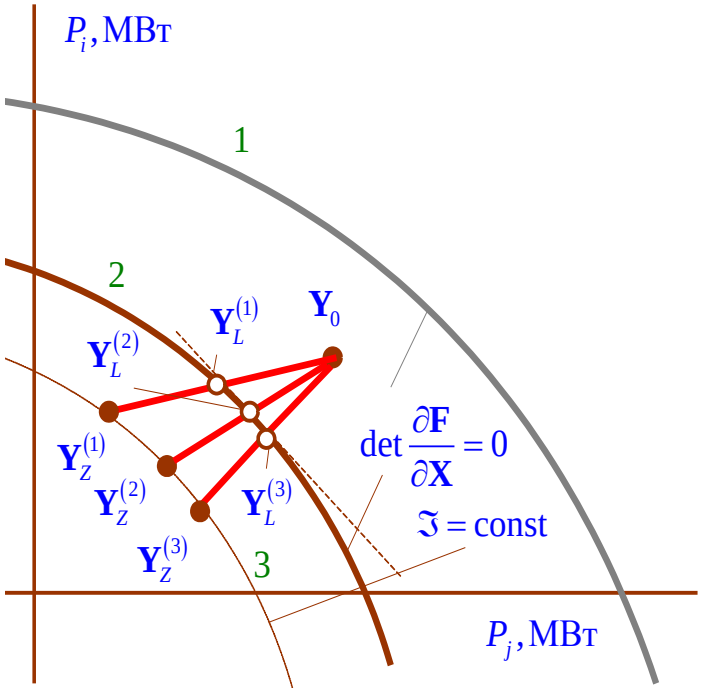


Рисунок 30 – К задаче ввода послеаварийного режима в область устойчивости

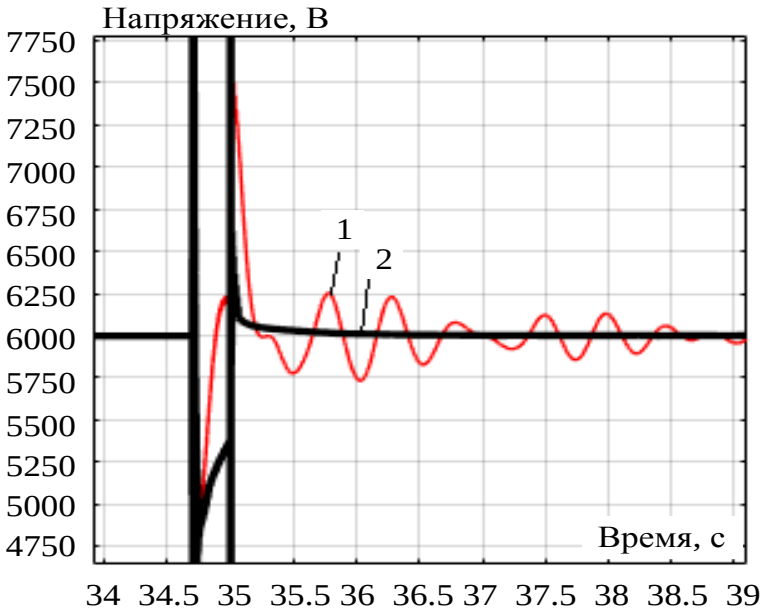
Рассчитанные параметры $\mathbf{X}$ в результате минимизации (11) используются в качестве начальных приближений. Это обеспечивает сходимость решения к точкам $\mathbf{Y}_L$, лежащим на «ближних» границах области САУ. На рис. 30 представлено пояснение к задаче ПАУ на сечениях области устойчивости. На рисунке цифрами обозначено следующее: 1 – граница области САУ для полной сети; 2 – граница области САУ при отключении одной из основных ЛЭП; 3 – граница, отвечающая условию $\Im = \text{const}$, где $\Im$ – запас устойчивости послеаварийного режима. В таком описании задача противоаварийного управления ГУ объектов РГ заключается в достижении одной из точек:

$$\mathbf{Y}_Z^{(1)} = \mathbf{Y}_0 + D\mathbf{Y}^{(1)} = \mathbf{Y}_0 + t_1 \Delta \mathbf{Y}^{(1)},$$
$$\mathbf{Y}_Z^{(2)} = \mathbf{Y}_0 + D\mathbf{Y}^{(2)} = \mathbf{Y}_0 + t_2 \Delta \mathbf{Y}^{(2)},$$
$$\mathbf{Y}_Z^{(3)} = \mathbf{Y}_0 + D\mathbf{Y}^{(3)} = \mathbf{Y}_0 + t_3 \Delta \mathbf{Y}^{(3)},$$

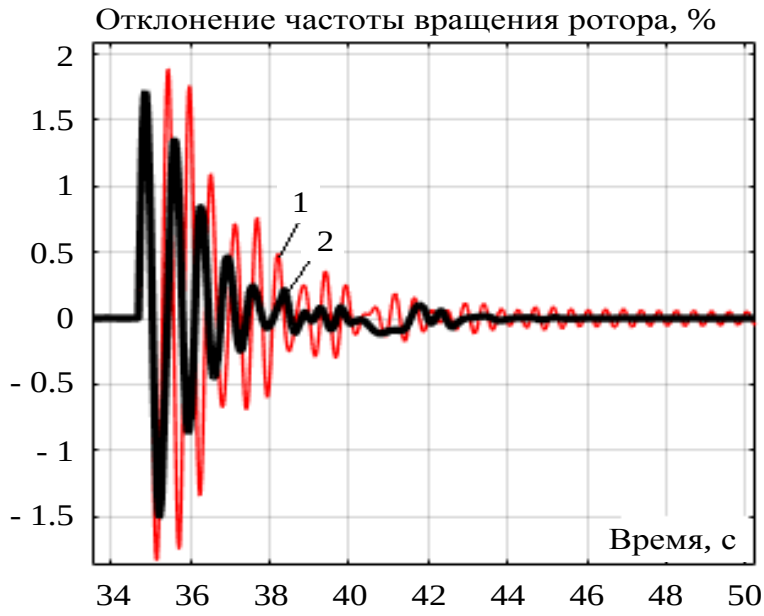
где $D\mathbf{Y}^{(k)}, k = 1..3$ – траектории изменения режима; $\Delta \mathbf{Y}^{(k)}, k = 1..3$ – направления изменения режима; $t_k, k = 1..3$ – скалярные параметры, определяющие величину разгрузки. При значении индекса $k = 1$ рассматривается заданное изначально направление разгрузки. Когда индекс $k = 2$, то рассматривается разгрузка в направлении нормали к предельной гиперповерхности; индекс $k = 3$ отвечает разгрузке, обеспечивающей минимально возможный ущерб от отключений

источников и потребителей электроэнергии. Разгрузка генераторов в определенном направлении $\Delta \mathbf{Y}^{(k)}$ должна выполняться при приемлемом качестве динамических процессов, что обеспечивается рациональным управлением и настройкой регуляторов.

Моделирование выполнено для трехузловой электрической сети, в которой использовались две ГЭС мощностью по 24 МВт. Для исследования динамического перехода выполнено моделирование с учетом регуляторов, настроенных методом согласованной настройки для режимов минимальной, средней и максимальной загрузки генераторов. На основе полученных расчетов была составлена база правил нечеткой системы управления настройками АРВ и АРЧВ. При моделировании рассматривался ввод режима работы ГУ в область устойчивости при возникновении КЗ на ЛЭП и ее отключении релейной защитой через 0,3 с. Соответствующие результаты моделирования показаны на рис. 31.



(а)



(б)



(в)

Рисунок 31 – Параметры ГУ при отключении линии и вводе режима в область САУ по кратчайшей траектории: (а) – напряжение; (б) – отклонение частоты вращения ротора; (в) – активная мощность генератора; 1 – без изменения коэффициентов настройки АРВ и АРЧВ; 2 – нечеткое управление настройками АРВ и АРЧВ

По результатам имитационного моделирования можно отметить:

1. Для напряжения генератора (рис. 31, а) использование нечеткой системы позволило в 4 раза уменьшить время переходного процесса;

2. Незначительно (на 0,6 %) снижается максимальное отклонение частоты вращения ротора генератора от номинального установившегося значения. Однако, для мощности генератора наблюдается снижение перерегулирования на 19%.

Далее представлен метод противоаварийного управления на основе УПР в ЭЭС с РГ, использующий у генераторов АРВ и АРЧВ прогностического типа. При моделировании были получены аналогичные результаты, определяющие эффективность применения самонастраивающихся прогностических АРВ и АРЧВ генераторов, обеспечивающих более качественный динамический переход системы при вводе режима в область устойчивости.

В заключении диссертации сформулированы основные результаты.

В приложениях A, B и C представлено описание программного комплекса идентификации и оптимальной настройки АРВ и АРЧВ синхронных генераторов, описание компьютерной модели СЭС промышленного предприятия и ее настройка по данным реальных измерений, а также технико-экономическое обоснование применения метода согласованной настройки АРВ и АРЧВ синхронного генератора малой мощности. В приложениях D и E приводятся акты использования и внедрения результатов диссертационной работы, а также свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и патент на изобретение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе предложено решение научно-технической проблемы обеспечения устойчивости и адаптивности управления генерирующими установками объектов распределенной генерации в условиях низкого качества электроэнергии, имеющей важное народно-хозяйственное значение для электроэнергетики и экономики России.

Общие результаты диссертационной работы:

1. Работа включает разработку имитационных моделей различных генерирующих установок объектов распределенной генерации и активных сетевых элементов, оснащённых системами автоматического регулирования и интеллектуальными средствами управления. Имитационные модели могут использоваться в исследованиях динамических режимов электроэнергетических систем и разработках систем автоматического регулирования.

2. Предложен и программно реализован метод идентификации модели генерирующей установки на основе экспериментальных данных. Метод отличается от традиционных подходов использованием вейвлет-преобразования для выделения шумов регуляторов и применением искусственных нейронных сетей с системой нечеткого логического вывода. Такой подход учитывает особенности работы системы электроснабжения в условиях низкого качества электроэнергии и изменяющихся режимов её функционирования. Разработанный метод идентификации может использоваться при решении задач настроек регуляторов синхронных генераторов.

3. Разработан и программно реализован алгоритм для построения непараметрических моделей генерирующих установок на основе искусственных нейронных сетей и нечеткой логики. Предложенный алгоритм может применяться при построении цифровых двойников динамических систем.

4. Выполнена оценка воздействия несимметричной и нелинейной нагрузки на работу маломощного синхронного генератора. При увеличении уровней несимметрии и несинусоидальности наблюдался рост токов статора и ротора, а также появлялись вынужденные колебания электрических и механических параметров синхронного генератора. Это повышало вероятность потери устойчивости генератора. Исследования подтвердили, что внедрение вставок постоянного тока и/или энергетических роутеров эффективно решает проблемы с качеством электроэнергии в системах электроснабжения для длительного использования синхронных генераторов малой мощности.

5. Предлагаются методы уменьшения провалов напряжения и улучшения качества электроэнергии в системах электроснабжения, которые отличаются от широко используемых решений применением ВПТ и управляемого энергетического роутера с накопителем электроэнергии. Эти подходы направлены также на решение проблем, связанных с несимметрией и несинусоидальностью в системах электроснабжения. Проведенные исследования показывают высокую эффективность снижения провала напряжения в СЭС при использовании

энергетических роутеров в сочетании с накопителями электроэнергии. Данные системы и полученные результаты могут использоваться при внедрении в СЭС распределенной генерации, зарядных станций электромобилей и накопителей электроэнергии.

6. Разработана имитационная модель регулятора выходного инвертора энергороутера и предложен алгоритм регулирования напряжения на стороне постоянного и переменного тока инвертора в системе с зарядными станциями электромобилей. Использование предлагаемого регулятора напряжения инвертора энергороутера и аккумуляторов электромобилей в режиме включения мощной нагрузки позволяет поддерживать напряжение у потребителя вблизи номинального значения. Это также позволило улучшить качество электроэнергии, снизив амплитуды гармоник напряжения в электрической сети с зарядными станциями электромобилей. Суммарный коэффициент гармоник THD при использовании предлагаемого регулятора снизился в 1,7 раза. Полученные результаты способствуют проведению дальнейших исследований в направлении разработки систем автоматического регулирования напряжения преобразователей энергороутера и зарядных станций со встроенным активным фильтром для улучшения качества электроэнергии.

Результаты работы переданы для использования в АО «ХОЛДИНГ ЭРСО» в виде моделей и результатов моделирования энергороутера на основе высокочастотного трансформатора для подключения потребителей электроэнергии к СЭС с низким качеством электроэнергии.

7. Разработан и программно реализован алгоритм метода согласованной настройки АРВ и АРЧВ синхронного генератора с оптимизацией параметров настройки регуляторов. Получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Разработанный программный комплекс можно применять на практике для оптимизации параметров настройки регуляторов синхронных генераторов и при исследованиях новых алгоритмов АРВ и АРЧВ. В среднем использование только согласованной настройки регуляторов позволяет снизить перерегулирование напряжения на 5% и время переходного процесса для напряжения в 3 раза, а для частоты вращения ротора в 1,4 раза в зависимости от тяжести возмущения.

Проект по внедрению метода согласованной настройки регуляторов привлекателен с финансовой точки зрения. Для рассматриваемого турбогенератора мощностью 3,125 МВА срок окупаемости составляет 4,5 года, а чистый дисконтированный доход составляет 94967 рублей.

8. Предложена адаптивная система управления параметрами регуляторов генерирующей установки, основанная на нейронных сетях и системе нечеткого логического вывода. Применение такой интеллектуальной системы управления позволяет уменьшить время переходного процесса и снизить уровень перерегулирования напряжения и частоты. В рассмотренном примере по сравнению с обычной системой регулирования, т.е. без интеллектуального управления настройками регуляторов, время переходного процесса для частоты уменьшается в 2,5 раза, а величина перерегулирования – на 1,2 %, и на 2,5%

уменьшается провал напряжения при подключении мощной нагрузки. При этом обеспечивается необходимый запас устойчивости и адаптивность системы управления ко всем возможным режимам работы. Применение предлагаемой системы управления настройками АРВ и АРЧВ генераторов позволит решить проблемы поиска оптимальных настроек регуляторов при внедрении в эксплуатацию генерирующих установок объектов распределенной генерации.

9. Созданы структуры, алгоритмы работы, имитационные модели и методы настройки локальных и групповых прогностических регуляторов напряжения и частоты, которые могут использоваться при эксплуатации генерирующих установок объектов распределенной генерации и улучшения их показателей качества регулирования. В рассмотренных примерах использование прогностических АРВ и АРЧВ турбогенератора позволило в 2,8 раза снизить отклонение частоты вращения ротора и в 2,5 раза уменьшить величину перерегулирования напряжения при подключении мощной нагрузки. Результаты экспериментов подтверждают, что использование прогностических автоматических регуляторов напряжения и частоты в газотурбинной установке значительно улучшает демпферные характеристики системы.

Результаты моделирования на физической модели показывают высокую эффективность использования предлагаемых самонастраивающихся прогностических АРВ и АРЧВ. В рассмотренных режимах провал частоты вращения ротора генератора снижался на 34 %, а перерегулирование уменьшалось на 32 %. Применение самонастраивающегося прогностического АРЧВ позволило улучшить управление параметрами генератора: при подключении мощной нагрузки перерегулирование напряжения уменьшалось на 21 %; при отключении нагрузки провал напряжения снижался на 13 %. При удаленном КЗ длительностью 1 с использование самонастраивающегося прогностического АРЧВ позволяет уменьшить в 1,3 раза провал и снизить в 2,6 раза перерегулирование частоты.

Внедрение самонастраивающихся инерционно-форсирующих звеньев в АРВ и АРЧВ позволит решить проблему адаптации настроек регуляторов ГУ объектов распределенной генерации к изменяющимся схемно-режимным условиям в ЭЭС.

10. Разработаны структуры, алгоритмы работы и имитационные модели АРВ и АРЧВ для асинхронного генератора двойного питания (АГДП). Представлена структура имитационной модели самонастраивающегося прогностического АРЧВ, позволяющего эффективно регулировать скорость вращения ротора АГДП и частоту в СЭС с низким качеством электроэнергии. В частности, использование в АРЧВ самонастраивающегося инерционно-форсирующего звена у АГДП в режиме кратковременного удаленного КЗ позволяет: на 33,3% уменьшить время переходного процесса скорости ротора и частоты в сети; на 42,1% снизить перерегулирование скорости ротора и на 28,6% перерегулирование частоты; на 56% улучшить степень затухания колебаний скорости ротора АГДП и на 52% частоты в сети.

Таким образом, разработанные алгоритмы прогностических регуляторов универсальны и могут эффективно использоваться как для синхронных, так и для асинхронных генераторов.

11. Предложены методы устранения фликера и повышения качества электроэнергии в сетях с наличием малой распределенной генерацией. Эти методы включают согласованную настройку автоматических регуляторов напряжения и частоты, а также использование инерционно-форсирующего звена для реализации прогностических алгоритмов. Согласованная настройка и прогностические алгоритмы в АРВ и АРЧВ синхронных генераторов позволяют без дополнительных затрат улучшить качество электроэнергии в части отклонения напряжения и частоты, улучшения синусоидальности кривой напряжения, а также решить проблему возникновения фликера при использовании распределенной генерации малой мощности. Дополнительный эффект заключается в улучшении показателей качества регулирования: время переходного процесса частоты вращения ротора генератора уменьшается в 4 раза, а величина перерегулирования – в 10 раз. Кроме этого практически отсутствует колебательность частоты и напряжения.

12. Разработан метод противоаварийного управления генерирующими установками с применением модифицированных уравнений предельных режимов ЭЭС и обеспечением плавного динамического перехода с помощью нечеткой системы управления согласованной настройкой регуляторов генераторов и прогностических алгоритмов. Данный метод позволяет решать задачи противоаварийного управления синхронными генераторами в ЭЭС с сохранением устойчивой работы и обеспечением плавного динамического перехода в аварийных и послеаварийных режимах.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Булатов, Ю.Н.** Мультиагентная система управления установками распределённой генерации / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2015. – № 11-12. – С. 97-107. (*категория **К2***).

2. **Булатов, Ю.Н.** Применение вейвлет-преобразования и генетических алгоритмов для настройки автоматических регуляторов установок распределенной генерации / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2016. – № 2 (63). – С. 7-22.

3. **Булатов, Ю.Н.** Прогностические регуляторы для установок распределенной генерации / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, В.Х. Нгуен // Системы. Методы. Технологии. – 2016. – № 1 (29). – С. 63-69. (*категория **К2***).

4. **Булатов, Ю.Н.** Методика настройки прогностических регуляторов установок распределенной генерации / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, В.Х. Нгуен //

Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2016. – № 11-12. – С. 84-95. (*категория **К2***).

5. **Булатов, Ю.Н.** Определение параметров прогностических регуляторов для установок распределенной генерации систем электроснабжения железных дорог / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, В.Х. Нгуен // Системы. Методы. Технологии. – 2016. – № 2 (30). – С. 84-91. (*категория **К2***).

6. **Булатов, Ю.Н.** Влияние несимметричной нагрузки на работу турбогенераторов установок распределенной генерации / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков // Системы. Методы. Технологии. – 2016. – № 3 (31). – С. 85-93. (*категория **К2***).

7. **Булатов, Ю.Н.** Влияние нелинейной нагрузки на работу турбогенераторов установок распределенной генерации / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков // Системы. Методы. Технологии. – 2016. – № 4 (32). – С. 95-100. (*категория **К2***).

8. **Булатов, Ю.Н.** Автопрогностический регулятор частоты вращения ротора генератора установки распределенной генерации / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, В.Х. Нгуен // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2017. – № 1 (66). – С. 15-25.

9. **Булатов, Ю.Н.** Интеллектуальные системы управления установками распределенной генерации / Ю.Н. Булатов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21. – № 10 (129). – С. 78-94.

10. **Булатов, Ю.Н.** Влияние нелинейной и несимметричной нагрузки на работу генераторов установок распределенной генерации / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков // Системы. Методы. Технологии. – 2017. – № 3 (35). – С. 40-49. (*категория **К2***).

11. **Булатов, Ю.Н.** Устранение фликера в сетях с установками распределенной генерации на основе согласованно настроенных регуляторов / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков // Системы. Методы. Технологии. – 2017. – №4(36). – С. 108-114. (*категория **К2***).

12. **Булатов, Ю.Н.** Качество электроэнергии в высоковольтных электрических сетях, питающих тяговые подстанции ТРАНССИБА / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, А.В. Черепанов // Энергетическая политика. – 2018. – № 1. – С. 86-95. (*категория **К1***).

13. **Булатов, Ю.Н.** Применение накопителей энергии и управляемых установок распределенной генерации для снижения провалов напряжения в сетевом энергетическом кластере / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, В.Х. Нгуен // Системы. Методы. Технологии. – 2018. – № 2 (38). – С. 38-43. (*категория **К2***).

14. **Булатов, Ю.Н.** Моделирование режимов работы систем электроснабжения с установками распределенной генерации и мощной асинхронной нагрузкой / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, В.Х. Нгуен // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2018. – № 4 (73). – С. 101-114.

15. **Булатов, Ю.Н.** Метод пассивной идентификации математической модели установки распределенной генерации / Ю.Н. Булатов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2019. – Т. 23. – № 2 (145). – С. 296-309.

16. **Булатов, Ю.Н.** Противоаварийное управление установками распределенной генерации / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков // Электричество. – 2019. – № 2. – С. 18-25. (*категория **К1**, **RSCI***).

17. **Булатов, Ю.Н.** Управление режимами систем электроснабжения с установками распределенной генерации, сформированными на основе асинхронизированных машин / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, Э.К. Шуманский // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2020. – №1(78). – С. 175-188.

18. **Булатов, Ю.Н.** Математические модели для определения предельных режимов в электрических сетях с установками распределенной генерации / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, А.В. Черепанов // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2020. – № 4 (80). – С. 17-36.

19. **Булатов, Ю.Н.** Моделирование газотурбинной установки с прогностическими регуляторами напряжения и скорости / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, В.Х. Нгуен // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2020. – Т.22. – № 3. – С. 60-67. (*категория **К2***).

20. **Булатов, Ю.Н.** Координация настроек автоматических регуляторов паротурбинной установки распределенной генерации / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, В.Х. Нгуен // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2020. – Т. 24. – № 1 (150). – С. 112-122.

21. **Булатов, Ю.Н.** Исследование режимов работы изолированной системы электроснабжения с управляемыми установками распределенной генерации, накопителями электроэнергии и двигательной нагрузкой / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, К.В. Суслов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. – № 5. – С. 184-194. (*категория **К2***).

22. **Булатов, Ю.Н.** Оперативное определение запасов статической устойчивости в системах электроснабжения с установками распределенной генерации / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, К.В. Суслов, А.В. Черепанов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2021. – Т. 25. – №1 (156). – С. 31-43.

23. **Булатов, Ю.Н.** Применение асинхронизированных генераторов в электрических сетях с пониженным качеством электроэнергии / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, Э.К. Шуманский // Электричество. – 2021. – № 7. – С. 33-40. (*категория **К1**, **RSCI***).

24. **Булатов, Ю.Н.** Групповые прогностические регуляторы напряжения и частоты для установок распределенной генерации / Ю.Н. Булатов // iPolytech Journal. – 2021. – Т. 25. – № 5 (160). – С. 568-585. (*категория **К1***).

25. **Булатов, Ю.Н.** Устранение фликера в сетях с установками распределенной генерации с помощью групповых прогностических регуляторов напряжения и частоты / Ю.Н. Булатов // iPolytech Journal. – 2022. – Т.26. – №2. – С. 228-244. (*категория **К1***).

26. **Булатов, Ю.Н.** Прогностическое управление турбогенераторной установкой на основе самонастраивающихся регуляторов / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, К.В. Суслов // Энергетик. – 2023. – № 7. – С. 9-13. (*категория **К2***).

27. **Булатов, Ю.Н.** Регулирование напряжения в микросети постоянного и переменного тока на базе энергороутеров и накопителей электроэнергии /

Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, К.В. Суслов // Интеллектуальная электротехника. – 2023. – № 1 (21). – С. 62-84.

28. **Булатов, Ю.Н.** Согласованное управление накопителями электроэнергии и установкой распределенной генерации с прогностическими регуляторами в системе электроснабжения с пониженным качеством электроэнергии / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, К.В. Суслов, В.В. Кижин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2023. – Т. 25. – № 6. – С. 3-13. (*категория **К2***).

29. **Булатов, Ю.Н.** Зарядные станции электромобилей на основе энергороутеров / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, К.В. Суслов, В.В. Кижин // Энергетик. – 2025. – № 10. – С. 41-45. (*категория **К2***).

Журнальные статьи, опубликованные в зарубежных изданиях, индексируемых международными наукометрическими базами Web of Science / Scopus:

30. **Bulatov, Yu.N.** Group predictive voltage and frequency regulators for small hydro power plant in the context of low power quality / Yu.N. Bulatov, A.V. Kryukov, K.V. Suslov // Renewable Energy. – 2022. – Vol. 200. – pp. 571-578. – https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.10.017. (*входит в **Q1***).

31. **Bulatov, Y.** Digital Twin Formation Method for Distributed Generation Plants of Cyber–Physical Power Supply Systems / Y. Bulatov, A. Kryukov, A. Batuhtin, K. Suslov, K. Korotkova, D. Sidorov // Mathematics. – 2022. – 10. – 2886. – https://doi.org/10.3390/math10162886. (*входит в **Q1***).

32. **Bulatov, Y.** A Stochastic Model for Determining Static Stability Margins in Electric Power Systems / Y. Bulatov, A. Kryukov, V. Senko, K. Suslov, D. Sidorov // Computation. – 2022. – 10. – 67. – https://doi.org/10.3390/ computation10050067. (*входит в **Q2***).

33. **Bulatov, Y.** Using Group Predictive Voltage and Frequency Regulators of Distributed Generation Plants in Cyber-Physical Power Supply Systems / Y. Bulatov, A. Kryukov, K. Suslov // Energies. – 2022. – 15. – 1253. – https://doi.org/10.3390/en15041253. (*входит в **Q1***).

34. **Bulatov, Y.** Simulation of Power Router-Based DC Distribution Systems with Distributed Generation and Energy Storage Units / Y. Bulatov, A. Kryukov, K. Suslov // Energies. – 2023. – 16. – 214. – https://doi.org/10.3390/en16010214. (*входит в **Q1***).

35. **Bulatov, Y.** Effect of Unbalanced and Non-Linear Loads on Operation of the Turbogenerator of a Distributed Generation Unit / Y. Bulatov, A. Kryukov, K. Suslov // Applied Sciences (Switzerland). – 2023. – 13(6). – 3643. – https://doi.org/10.3390/app13063643. (*входит в **Q2***).

36. **Bulatov, Y.** Methods for ensuring stability of operating conditions of an electric power system with distributed generation plants / Iliya Iliev, Andrey Kryukov, Yuri Bulatov, Konstantin Suslov, Ivan Beloev, Yuliya Valeeva // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. – 2025. –Vol. 16, No. 1. – http://doi.org/10.11591/ijpeds.v16.i1.pp138-150. (*входит в **Q2***).

37. **Bulatov, Y.** Modeling an Energy Router with an Energy Storage Device for Connecting Electric Vehicle Charging Stations and Sustainable Development of Power Supply Systems / Y. Bulatov, A. Kryukov, K. Suslov, I. Iliev, H. Beloev, I. Beloev // Sustainability. – 2025, 17, 11041. https://doi.org/10.3390/ su172411041. (*входит в **Q1***).

38. **Bulatov, Y.** Mini-hydropower plant based on asynchronized synchronous generators equipped with self-tuning predictive speed controllers / Yuri Bulatov, Andrey Kryukov, Konstantin Suslov // Renewable Energy, Volume 256, Part A, 2026, 123885, https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123885. (*входит в **Q1***).

39. **Bulatov, Y.** Enhancing the dynamic stability of electric power systems through the coordinated tuning of generator predictive controllers / H. Beloev, Y. Bulatov, A. Kryukov, K. Suslov, Y. Valeeva, M. Dudek, I. Iliev // International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS). – 2026, Vol. 17, No. 1. – pp. 211-222. https://doi.org/10.11591/ijpeds.v17.i1.pp211-222. (*входит в **Q2***).

Монографии:

40. **Булатов, Ю.Н.** Модели и методы настройки систем регулирования возбуждения генераторов на основе экспериментальных данных: монография / И.В. Игнатьев, Ю.Н. Булатов. – Братск: Изд-во БрГУ, 2016. – 278 с.

41. **Булатов, Ю.Н.** Применение технологий распределенной генерации в системах энергоснабжения промышленных предприятий: монография / А.В. Крюков, Ю.Н. Булатов, А.Г. Батухтин, М.С. Басс, С.Г. Батухтин, А.А. Середкин, М.Г. Барановская, В.И. Рудой, Д.А. Яковлев, В.В. Романова.–Чита: ЗабГУ, 2022. – 266 с.

42. **Булатов, Ю.Н.** Киберфизические системы электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии : моделирование и управление : монография / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, К.В. Суслов. – Москва : РУДН, 2025. – 172 с.

Публикации в прочих изданиях:

43. **Булатов, Ю.Н.** Повышение надежности систем электроснабжения с установками распределенной генерации / Ю.Н.Булатов, А.В. Крюков // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Материалы 90-е заседания Международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко. В 2-х книгах. Ответственный редактор Н.И. Воропай. – 2018. – С. 76-85.

44. **Bulatov, Y.N.** Solving the flicker noise origin problem by optimally controlled units of distributed generation / Y.N. Bulatov, A.V. Kryukov, K.V. Suslov // 2018 Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP. – 2018. – pp. 1-4.

45. **Булатов, Ю.Н.** Согласование настроек регуляторов паротурбинной установки распределенной генерации / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, В.Х. Нгуен // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы юбилейной X Международной научно-технической конференции, 16-20 сентября 2019, Иркутск. − В 3 т. Т 3. – Иркутск, Иркутский национальный исследовательский технический университет. – 202 с.

46. **Bulatov, Y.** Ensuring postemergency modes stability in power supply systems equipped with distributed generation plants / Y. Bulatov, A. Kryukov, K. Suslov, N. Shamarova // Proceedings of the 10th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering: ELEKTROENERGETIKA. – 2019. – pp. 38-42.

47. **Булатов, Ю.Н.** Влияние асинхронизированных генераторов на аварийные режимы электрических сетей с пониженным качеством электроэнергии

/ Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, Э.К. Шуманский // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Вып. 71. Надежность энергоснабжения потребителей в условиях их цифровизации. В 3-х книгах. / Книга 3 / Отв. ред. Н.И. Воропай. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2020. – 364 с.

48. **Булатов, Ю.Н.** Исследование работы самонастраивающегося прогностического регулятора напряжения и частоты на кибер-физической модели установки распределенной генерации / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, К.В. Суслов // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Материалы 94-го заседания Международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко. Отв. редактор В.А. Стенников. Иркутск, 2022. С. 348-357.

49. **Bulatov, Y.N.** Operation of a Distributed Generation Plant in a Power Supply System with Non-linear and Asymmetric Load / Y.N. Bulatov, A.V. Kryukov, K.V. Suslov // 20th International Conference on Harmonics & Quality of Power (ICHQP). – 2022. – pp. 1-6. – https://doi.org/10.1109/ICHQP53011.2022.9808605.

50. **Булатов, Ю.Н.** Применение прогностических регуляторов частоты вращения ротора для асинхронизированных гидрогенераторов / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, К.В. Суслов, Э.К. Шуманский // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Материалы 96-го заседания Международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко. Иркутск, 2024. С. 235-243.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

51. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2010615862. Оптимизация коэффициентов стабилизации систем АРВ и АРЧВ генераторов электростанций (ARE&ARRF v. 1.00) / И.В. Игнатьев, **Ю.Н. Булатов**. – Опубл. 08.09.2010.

52. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011617041. Нечёткая идентификация односвязных систем (FLI v. 1.00) / **Ю.Н. Булатов**, М.А. Приходько. – Опубл. 12.09.2011.

53. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025690377. Wavelet filter / В.В. Кижин, **Ю.Н. Булатов** – Опубл. 06.11.2025.

Патент на изобретение в РФ:

54. Патент №2823536 Российская Федерация, МПК H02P 27/06; G05B 13/02. Способ автоматического регулирования частоты вращения ротора синхронного генератора и регулятор для его реализации / **Ю.Н. Булатов**, А.В. Крюков. – Опубл. 23.07.2024, Бюл. №21.

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Тел./факс (383) 346-08-57
Формат 60x84 1/16. Объем 2,8 п.л. Тираж 120 экз.
Заказ № 2023. Подписано в печать 16.11.2026 г.