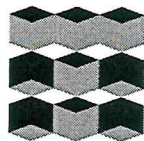


ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

Аскарлов Алишер Бахрамжонович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ И СРЕДСТВ НАСТРОЙКИ АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ В УСЛОВИЯХ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

2.4.3 – Электроэнергетика

Томск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель:

Андреев Михаил Владимирович

кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, г. Томск

Официальные оппоненты:

Илюшин Павел Владимирович

доктор технических наук, Институт энергетических исследований Российской академии наук, руководитель Центра интеллектуальных электро-энергетических систем и распределенной энергетики, главный научный сотрудник

Соснина Елена Николаевна

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, профессор кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника»

Защита состоится «03» мая 2023 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.17 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, ул. Усова, 7, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru.

Автореферат разослан «____» февраля 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ДС.ТПУ.17
кандидат технических наук

М.В. Андреев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Проблема и ее актуальность. Одной из важнейших задач в области электроэнергетики является обеспечение надежности и устойчивости функционирования современных электроэнергетических систем (ЭЭС) в условиях их постоянного развития и усложнения структуры, связанных как со строительством и вводом в эксплуатацию новых энергообъектов, электрических сетей и электроустановок, так и с переоснащением и модернизацией уже используемых в настоящее время объектов. Под новыми объектами в составе современных ЭЭС в диссертационной работе понимаются объекты генерации на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), к которым преимущественно относятся ветроэнергетические (ВЭУ) и фотоэлектрические (ФЭУ) установки, а также различные технологии гибких систем передачи переменного тока (ГСППТ). Внедрение подобного рода устройств и установок помимо неоспоримых положительных аспектов вызывает и ряд негативных последствий, которые непосредственно связаны с проблемами режимного и противоаварийного управления ЭЭС. В частности, могут ухудшаться динамические свойства ЭЭС за счет снижения общей постоянной инерции и недостатка резервов мощности, увеличиваться скорость протекания процессов и максимальные отклонения параметров электрического режима в первый момент после возмущения и, как следствие, возрастать вероятность нарушения устойчивости параллельной работы электростанций или частей ЭЭС с последующим каскадным развитием аварийных процессов вплоть до разделения системы и отключения большого числа потребителей.

Одним из основных средств обеспечения устойчивости ЭЭС являются устройства автоматического регулирования возбуждения (АРВ) синхронных генераторов (СГ), устанавливаемые на традиционных электрических станциях (тепловых, гидравлических и атомных), которые в том числе отвечают за все виды устойчивости (статическую апериодическую, статическую колебательную и динамическую) как отдельных агрегатов, так и всей ЭЭС в целом. Отмеченные изменения в ЭЭС определяют необходимость решения вопросов, связанных с эффективной настройкой систем управления возбуждением, адекватной реальным условиям их функционирования, для оптимального регулирования напряжения, повышения запасов статической и динамической устойчивости, обеспечения интенсивного демпфирования локальных, межсистемных и послеаварийных электромеханических колебаний, возникающих в ЭЭС. Важность решения этой задачи обусловлена тем, что, как показывает мировой опыт эксплуатации ЭЭС со значительной долей объектов ВИЭ, полномасштабный переход от централизованной к децентрализованной схеме электроснабжения и полноценный отказ от мощных традиционных источников энергии в настоящий момент не является возможным ввиду возникновения ряда проблем, частично обозначенных ранее.

При этом существующие подходы к настройке устройств АРВ в случае рассмотрения как ЭЭС традиционной структуры, так и современных ЭЭС не всегда способны обеспечить требуемое качество регулирования и эффективность работы данной режимной автоматики в целом, что определяется, в частности, используемыми средствами для получения необходимой информации о режимах и процессах в ЭЭС различной конфигурации, которая в дальнейшем применяется для настройки каналов АРВ СГ. Данный факт подтверждается статистикой и анализом крупных системных аварий за последние десятилетия, связанных с работой различных систем управления и в том числе АРВ СГ. Настройка АРВ СГ даже для традиционных ЭЭС является нетривиальной задачей, что связано с уникальными

свойствами и характеристиками данных систем, в которых процесс производства, трансформации, передачи, распределения и потребления электроэнергии представляет собой единый и непрерывный процесс, предопределяющим сложную структуру подобных энергообъединений и взаимосвязь всего вовлеченного в этот процесс оборудования. При этом существующие методики и используемые для настройки АРВ СГ средства не в полной мере позволяют учесть особенности функционирования ВИЭ и устройств ГСППТ. Таким образом, принимая во внимание современную тенденцию развития ЭЭС, связанную с внедрением новых объектов ВИЭ и устройств ГСППТ, существенно изменяющих динамику протекания процессов в энергосистеме, в особенности переходных, а также учитывая специфику их влияния на все виды устойчивости ЭЭС в целом, возникает актуальная задача определения новых, адекватных реальным условиям настроек АРВ различного типа, обеспечивающих их эффективное функционирование в различных схемно-режимных ситуациях для обеспечения надежности и сохранения устойчивости функционирования ЭЭС. В диссертационной работе для комплексного и всестороннего решения данной задачи предлагается использовать основанный на концепции гибридного моделирования Всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС), который, в силу своих свойств и возможностей, позволяет обеспечить получение полной и достоверной информации о нормальных и аномальных квазиустановившихся и переходных процессах в ЭЭС любой необходимой конфигурации и структуры, используя достаточно полную и адекватную математическую модель реальной ЭЭС.

Степень разработанности темы исследования. Принципам построения систем АРВ СГ, а также разработке методик по их настройке и другим различным аспектам в данной области посвящено множество работ как отечественных ученых и специалистов: Андреева М.В., Беляева А.Н., Ботвинника М.М., Булатова Ю.Н., Веникова В.А., Герасимова А.С., Глебова И.А., Горева А.А., Гурикова О.В., Есиповича А.Х., Зеленина А.С., Зеленохат Н.И., Игнатъева И.В., Илюшина П.В., Кабанова Д.А., Климовой Т.Г., Когана Ф.Л., Лебедева С.А., Литкенс И.В., Логинова А.Г., Паздерина А.В., Покровского М.И., Рагозина А.А., Смоловик С.В., Сорокина Д.В., Сосниной Е.Н., Строева В.А., Тащилина В.А., Штефка Й., Юрганова А.А. и др., так и зарубежных ученых: Abido M.A., Concordia C., Folly K.A., Guo Q., Hiyama T., Hope G.S., Hsu Y.Y., Kamwa I., Kundur P., Malik O.P., Mukherjee V., Ngamroo I., Panda S., Shayeghi H., Venayagamoorthy G.K., Vournas C.D., Wang H.F., Yokoyama R. и др. Однако, несмотря на это, в настоящее время остается довольно много дискуссионных вопросов, связанных с получением параметров настройки АРВ СГ электрических станций, наиболее адекватных реальным условиям их функционирования. В связи с этим **идея работы**, посвященная решению обозначенной проблемы настройки устройств АРВ СГ в условиях развития современных ЭЭС с применением методики и средств, в основе которых лежит комплексный гибридный подход к моделированию подобных ЭЭС, является актуальной для мировой электроэнергетики в целом.

Целью работы является совершенствование методики и разработка средств для анализа и выбора оптимальных настроек устройств АРВ СГ с точки зрения эффективного демпфирования колебаний параметров электрического режима, а также обеспечения высоких запасов колебательной и динамической устойчивости современных ЭЭС в целом с применением информации о режимах и процессах, полученной с помощью средств гибридного моделирования ЭЭС.

Объектом исследования является СГ, работающий в составе ЭЭС с объектами ВИЭ и устройствами ГСППТ разного типа, состава и мощности при различных схемно-режимных условиях и возмущениях. **Предметом исследования** являются системы АРВ СГ, отвечающие за его функционирование как в нормальных, так и в переходных режимах.

Для достижения данной цели в работе поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Анализ влияния внедрения современных объектов ВИЭ и устройств ГСППТ, подключаемых через силовые преобразователи к электрической сети, в существующие ЭЭС на динамику протекания переходных процессов, а также статическую колебательную и динамическую устойчивость ЭЭС в целом.

2. Анализ основных широко используемых в настоящее время методов и средств для настройки АРВ СГ электрических станций, а также перспективных направлений в данной области.

3. Выявление и обоснование факторов, препятствующих комплексному решению проблемы адекватной реальным условиям функционирования настройки устройств АРВ в современных ЭЭС в рамках применения существующих и перспективных методов и средств.

4. Разработка теоретически и практически обоснованной концепции осуществления настройки АРВ СГ с учетом современных тенденций развития и модернизации ЭЭС, а также структуры и принципов построения средств ее реализации.

5. Разработка методики эффективной настройки устройств АРВ СГ в современных ЭЭС с объектами ВИЭ и устройствами ГСППТ.

6. Проведение комплекса экспериментальных исследований, подтверждающих свойства и возможности разработанных концепции, средств и методики настройки устройств АРВ СГ, которые обеспечивают успешное решение исследуемой проблемы, а также достижение цели диссертационной работы.

Научная новизна работы:

1. Усовершенствована методика настройки АРВ СГ электрических станций в современных ЭЭС за счет учета особенностей функционирования и режимов работы объектов ВИЭ и устройств ГСППТ при формировании перечня рассматриваемых схемно-режимных условий работы ЭЭС и возмущений, в том числе характерных для указанных установок: изменение уровня генерации, отношения короткого замыкания и степени продольной компенсации в сети, изменение в параметрах настройки и алгоритмах функционирования систем автоматического управления, а также принципов работы в случае существенных отклонений уровня напряжения.

2. Доказана эффективность применения совокупности из трех квадратичных интегральных показателей качества для количественной оценки эффективности выбранных параметров настройки АРВ СГ на основе результатов моделирования переходных процессов, которые позволяют совокупно анализировать изменение амплитуды колебаний и время их затухания при рассмотрении большого многообразия схемно-режимных условий работы современных ЭЭС с ВИЭ и ГСППТ. Определены на основе экспериментальных данных характерные диапазоны изменения интегральных показателей, по которым может быть сделан вывод об уровне эффективности настройки АРВ СГ с использованием полученных значений.

Теоретическую значимость работы определяют:

- 1) обоснованная необходимость настройки АРВ СГ электрических станций, наиболее адекватной реальным условиям их функционирования при внедрении в современные ЭЭС различных объектов генерации на базе ВИЭ и устройств ГСППТ, а также выявленные причины её труднореализуемости при применении существующих средств и методик;
- 2) предложенная концепция настройки АРВ СГ с применением программно-аппаратных средств моделирования электромагнитных переходных процессов, позволяющих достоверно учесть влияние специфики и динамики функционирования современных установок, подключение которых к электрической сети осуществляется с использованием силовых преобразователей, на конечный результат настройки регуляторов возбуждения разного типа;
- 3) сформулированная в соответствии с рассмотренными аспектами влияния ВИЭ и ГСППТ на режимы и процессы в ЭЭС, а также с предложенной концепцией методика, определяющая общую последовательность и содержание действий по проведению процедуры настройки АРВ СГ в условиях развития современных ЭЭС.

Практическая значимость работы заключается в повышении надежности функционирования современных ЭЭС с ВИЭ и ГСППТ за счет обеспечения высоких запасов колебательной и динамической устойчивости, что определяется оптимальной и эффективной настройкой АРВ СГ электрических станций, которая осуществляется с учетом широкого многообразия схемно-режимных условий работы ЭЭС при различного рода возмущениях на ее детальной математической модели. Кроме того, благодаря разработанным средствам моделирования совместно с предложенной методикой и концепцией в целом становится возможным формирование определенных рекомендаций по повышению устойчивости современных ЭЭС за счет скоординированного использования возможностей управления ВИЭ или ГСППТ и АРВ СГ. Результаты диссертационной работы используются в ФГАОУ ВО НИ ТПУ в образовательных и научных процессах при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Электроэнергетика и электротехника», а также при реализации проектов РФФИ 20-38-90003 и РНФ 18-79-10006.

Методология и методы исследования. Решение поставленных в диссертационной работе задач выполнялось с использованием методов теоретического исследования, имитационного моделирования и экспериментального исследования. При проведении теоретических исследований применялись теория электрических машин, методы системного анализа, положения теории автоматического регулирования и управления, теории электромеханических и электромагнитных переходных процессов. При разработке необходимых программно-аппаратных средств моделирования энергоблока использовались методы математического моделирования ЭЭС, методы анализа линейных и нелинейных электрических цепей, положения теории методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений, а также методы схемотехнического анализа и концепция построения средств гибридного моделирования. Численные эксперименты выполнены на математической модели ЭЭС, реализованной в ВМК РВ ЭЭС.

Положения, выносимые на защиту:

1. Для эффективной настройки АРВ при рассмотрении современных ЭЭС необходимо воспроизведение в виде детальной модели, помимо электрической машины вместе с ее системами автоматического регулирования и управления, валопровода генератора с це-

лью анализа резонансных процессов в широком диапазоне частот (десятки-сотни герц), вероятность возникновения которых значительно возрастает при использовании установок с силовыми преобразователями.

2. При анализе переходных процессов в современных ЭЭС, проводимом для оценки эффективности настройки АРВ СГ электрических станций, необходимо воспроизведение объектов ВИЭ и устройств ГСППТ в виде детализированных нелинейных моделей, учитывающих коммутационные процессы в силовых преобразователях и их быстродействующие системы автоматического управления вместе с динамикой цепи постоянного тока, для получения наиболее полной и достоверной информации по всему значимому спектру процессов (0-1000 Гц).

3. С целью повышения эффективности настройки АРВ СГ в современных ЭЭС должны учитываться особенности функционирования объектов ВИЭ и устройств ГСППТ при формировании перечня рассматриваемых режимов и возмущений, в том числе характерных для обозначенных установок. Таким образом применение предлагаемой методики настройки АРВ СГ позволяет достигнуть большей эффективности демпфирования послеаварийных колебаний, например, время затухания колебаний в среднем уменьшается на 32% в сравнении с параметрами настройки, выбранными в соответствии с существующей методикой.

4. Применение трех квадратичных интегральных показателей качества переходных процессов, учитывающих амплитуду колебаний любого из параметров электрического режима и время их затухания, позволяет оценить эффективность параметров настройки АРВ СГ и сделать более комплексный вывод о качестве выбранных параметров, чем при анализе только времени затухания как критерия оценки.

Степень достоверности результатов. Достоверность полученных результатов обеспечивается за счет применения апробированных положений теории надежности и устойчивости ЭЭС, использования известных положений фундаментальных и прикладных наук, корректного использования математического аппарата и соответствующих математических моделей со структурой, адекватной исследуемым процессам, соответствия результатов теоретического анализа и экспериментальных исследований, непротиворечивости результатов диссертационной работы выводам, которые получены другими авторами, а также обсуждения отдельных положений и результатов работы с отечественными и зарубежными специалистами в рамках конференций и других научных мероприятий.

Связь работы с научными программами и грантами. Диссертационные исследования проводимые в рамках совершенствования методики и средств настройки автоматических регуляторов возбуждения выполнены при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-38-90003 «Исследование влияния процессов в современных электроэнергетических системах на функционирование автоматических регуляторов возбуждения и разработка методики их адекватной настройки») (2020–2022 гг.). Созданные автором математические модели регуляторов возбуждения отечественного и зарубежного типов, а также гибридные средства моделирования энергоблока использовались при выполнении исследований в проекте Российского научного фонда № 18-79-10006, направленного на изучение проблемы достоверности расчетов режимов и процессов в электроэнергетических системах с активно-адаптивными сетями и распределенной генерацией. Тематика исследований соответствует приоритетному направлению развития науки в Российской Федерации (указ Президента РФ № 899 от 7 июля 2011 г.): «Энергоэффективность,

энергосбережение, ядерная энергетика», а также находится в сфере критических технологий Российской Федерации «Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера».

Апробация результатов исследований. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и демонстрировались на XII Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» (Нижний Новгород, 2022), XIII Всероссийской научно-технической конференции «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике» (Чебоксары, 2022), XIV Всероссийской научно-технической конференции «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем» (Чебоксары, 2021), XXVI и XXV Международном научном симпозиуме студентов и молодых ученых имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2021 и 2022), Всероссийской научной конференции с международным участием и XII научной молодежной школы «Возобновляемые источники энергии» (Москва, 2020), XI Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» (Ставрополь, 2020), International Youth Scientific Conference on Heat and Mass Transfer in the Thermal Control System of Technical and Technological Energy Equipment (Томск, 2019), International Youth Scientific and Technical Conference Relay Protection and Automation (Москва, 2018), XX Всероссийской студенческой научно-практической конференции Нижневартковского государственного университета (Нижневартовск, 2018).

Публикации. Все основные положения и результаты диссертационной работы отражены в 16 работах, в числе которых 6 статей в рецензируемых изданиях перечня ВАК РФ, 3 статьи в изданиях, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science, также получены 1 патент РФ на изобретение и 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора состоит в разработке концепции гибридного моделирования энергоблока, структуры и принципов построения средств для реализации данной модели, создании экспериментальных средств, формировании положений методики настройки, постановке и планировании экспериментов, проведении опытов, обработке полученных результатов, анализе и обобщении полученных результатов, формулировке защищаемых положений и выводов. Постановка решаемых задач, планирование экспериментов и подготовка публикаций проводились совместно с научным руководителем. Автор выражает благодарность коллективу научно-исследовательской лаборатории «Моделирование электроэнергетических систем» Инженерной школы энергетики ТПУ (<http://mees.tpu.ru>) за помощь в проведении экспериментов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы из 203 наименований, содержит 172 страницы, 20 таблиц, 57 рисунков, а также 4 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обозначена проблема и обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, отражены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, приведены выносимые на защиту основные положения, а также сведения о методах исследования, достоверности результатов, структуре и объеме диссертации.

В первой главе на основе аналитического обзора работ и публикаций сделан вывод, что в результате развития современных ЭЭС за счет внедрения большого количества объектов генерации на базе ВИЭ и различных устройств ГСППТ, которые подключаются к электрической сети с помощью силовых преобразователей, происходит значительное изменение динамических свойств и характеристик ЭЭС, которое в свою очередь приводит к возникновению проблем обеспечения высоких запасов устойчивости и эффективного демпфирования колебаний параметров электрического режима, возникающих в результате различного рода возмущений.

В качестве решения обозначенных проблем в диссертационной работе проанализированы возможности АРВ СГ электрических станций, отвечающих за функционирование всей ЭЭС в целом в нормальных и переходных режимах, как инструмента по обеспечению надежности и устойчивости современных ЭЭС с ВИЭ и ГСППТ. Приведен комплексный анализ существующих направлений в области развития систем регулирования возбуждения СГ, а также совершенствования подходов к их настройке. При этом выделены сложности применения нового типа устройств АРВ, обладающих нелинейной структурой, добавления новых каналов стабилизации или сигналов регулирования, а также проблемы нахождения адекватных параметров настройки АРВ СГ традиционной линейной структуры в современных ЭЭС в рамках применения существующих и перспективных методик и средств их реализации.

Таким образом обосновано, что для современных ЭЭС остро встает вопрос адекватной проверки предварительно выбранных параметров настройки АРВ СГ. Наиболее эффективно это возможно сделать на подробной динамической математической модели ЭЭС, воспроизводящей объекты ВИЭ и устройства ГСППТ в виде их детальных математических моделей в составе совокупной модели ЭЭС большой размерности, которая также учитывает сложную топологию сети и множество объектов, расположенных в ней. При этом существующие различные специализированные программно-вычислительные и программно-аппаратные комплексы для моделирования электромеханических и электромагнитных переходных процессов, которые широко используются на практике, обладают рядом упрощений и ограничений, что в конечном счете значительно сказывается на достоверности получаемых результатов моделирования при настройке устройств АРВ СГ электрических станций. Последнее становится одной из основных причин возникновения аварий или недопустимых эксплуатационных режимов в современных ЭЭС.

В связи с вышеизложенным в диссертационной работе для комплексного решения обозначенной специфики моделирования современных ЭЭС в условиях внедрения разнообразных объектов генерации на базе ВИЭ и устройств ГСППТ предложено использовать средства моделирования электромагнитных переходных процессов, позволяющие осуществлять воспроизведение ЭЭС реальных размерностей без их значительного эквивалентирования с учетом детальных моделей различных устройств и объектов в их составе, с целью настройки АРВ СГ, наиболее адекватной реальным условиям их функционирования.

В качестве основы таких средств выступает ВМК РВ ЭЭС, разработанный с применением концепции гибридного моделирования, объединяющей в себе аналоговый, цифровой и физический подходы к моделированию ЭЭС, что позволяет исключить декомпозицию режимов и процессов, упрощение математических моделей элементов и совокупной модели ЭЭС в целом, ограничение интервала воспроизведения процессов, а также проблему сходимости итерационного процесса.

Во второй главе приведены сформированные положения концепции настройки АРВ СГ электрических станций с учетом применения в качестве инструмента для моделирования электромагнитных переходных процессов ВМК РВ ЭЭС, которые позволяют комплексно оценить влияние интеграции различного рода объектов генерации на базе ВИЭ и устройств ГСППТ в современные ЭЭС, а также провести необходимые мероприятия по корректировке и оптимизации параметров настройки устройств АРВ для обеспечения качественного управления режимами и необходимого уровня устойчивости ЭЭС в целом. Подобные свойства концепции обеспечиваются за счет возможности получения наиболее полной и достоверной информации о режимах и процессах в современных ЭЭС, которая затем используется для настройки устройств АРВ СГ. При этом в рамках предложенной концепции может использоваться любой другой инструмент моделирования, который обладает необходимыми свойствами и возможностями для успешного и эффективного выполнения требований, отраженных в положениях концепции.

В результате положения разрабатываемой концепции заключаются в следующем:

1. Применение ВМК РВ ЭЭС в качестве инструментальной основы для проведения процедуры определения оптимальной настройки АРВ СГ, за счет которого обеспечивается бездекомпозиционное воспроизведение единого непрерывного спектра нормальных и аномальных квазиустановившихся и переходных процессов в реальном времени с гарантированной точностью в конкретном оборудовании и совокупной трехфазной модели ЭЭС в целом, что обуславливает получение полной и достоверной информации о режимах и процессах в ЭЭС.

2. Воспроизведение в ВМК РВ ЭЭС модели рассматриваемого СГ в составе энергоблока, включающего в себя все значимое оборудование с учетом наиболее детальной и достоверной модели настраиваемого устройства АРВ, на основе имеющейся исходной информации, требования для которой в частности изложены в стандарте АО «СО ЕЭС» СТО 59012820.29.160.20.004-2019 «Требования к системам возбуждения и автоматическим регуляторам возбуждения сильного действия синхронных генераторов». При этом в соответствии с Приказом Минэнерго РФ №102 установлено, что субъекты электроэнергетики должны предоставлять определенный перечень параметров и характеристик оборудования объектов по производству электрической энергии, в том числе по системам возбуждения и АРВ синхронных генераторов. Кроме того, данный перечень определяет необходимость предоставлять параметры и для других объектов: линий электропередачи, трансформаторов, средств компенсации реактивной мощности, а также объектов ВИЭ, что необходимо для п. 3 приведенной концепции. Задание необходимых параметров элементов модели и предварительных настроек АРВ, которые могут быть получены на основе анализа линеаризованной модели ЭЭС с применением различных методов, например, D -разбиения, корневого годографа и др.

3. Воспроизведение в ВМК РВ ЭЭС совокупной математической модели ЭЭС, включающей в себя модели генерирующего, сетевого оборудования, нагрузки, объектов генерации на базе ВИЭ, устройств ГСППТ и их системы автоматического регулирования (САР) и

управления (САУ) с необходимым и достаточным уровнем детализации на основе имеющейся исходной информации.

4. Разработка сценариев воспроизведения необходимых нормальных и аномальных режимов и процессов, которые в общем случае охватывают весь значимый спектр квазиустановившихся и переходных процессов, требуемых для оценки эффективности функционирования устройств АРВ СГ при проведении процедуры настройки.

5. Реализация в ВМК РВ ЭЭС сценариев экспериментальных исследований, сформированных в пункте 4, на примере совокупной математической модели ЭЭС с необходимым и достаточным уровнем детализации. Результаты воспроизведения сценариев используются для оценки предварительно выбранных параметров настройки устройств АРВ СГ электростанций путем сравнения с выбранными критериями. Корректировка и оптимизация параметров настройки регуляторов возбуждения в случае неудовлетворения критериям и обоснование необходимых изменений, которые также могут касаться типа регулятора или законов регулирования.

Также в главе приводятся результаты формирования структуры и реализации программно-аппаратных средств моделирования энергоблока в виде специализированного гибридного процесса (СГП), совместимого с ВМК РВ ЭЭС и содержащего в себе детализированные модели электрической машины с учетом возможности задания мультимассности вала, системы возбуждения, устройств АРВ любого типа и исполнения, первичного двигателя и его систем автоматического регулирования, нагрузки собственных нужд и силового блочного трансформатора (рисунок 1).

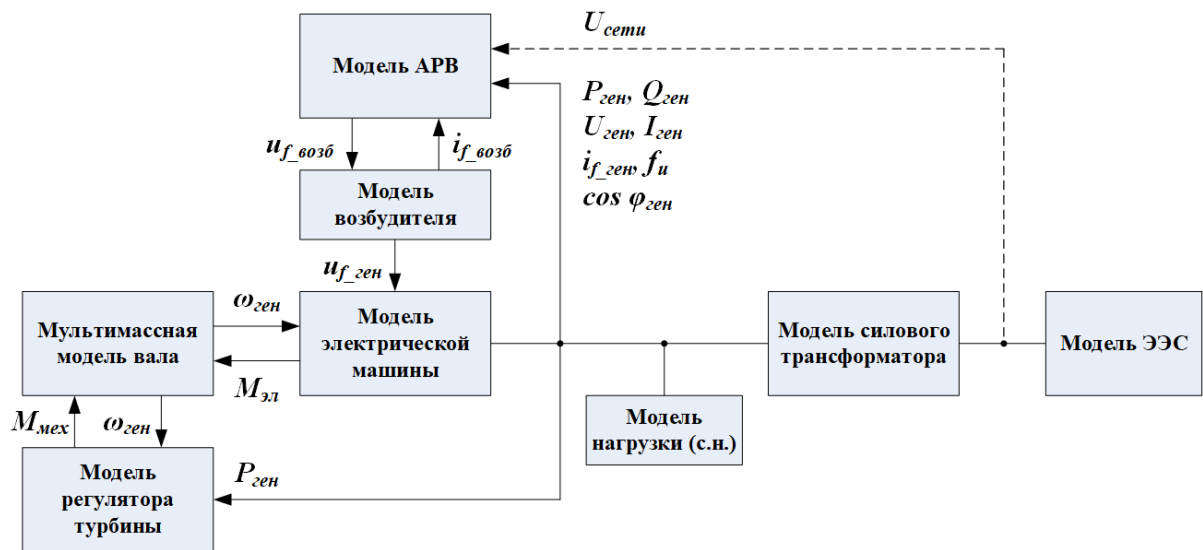


Рис. 1. Блок-схема модели энергоблока.

1. Модель электрической машины воспроизводится в виде полных уравнений Парка-Горева с тремя контурами по оси d и по оси q совместно с уравнениями взаимного преобразования переменных систем $dq0$ и abc . Возможность воспроизведения большого числа контуров в зависимости от доступных исходных данных повышает итоговую точность модели. Учет насыщения стали, в том числе для различных составляющих потока, также позволяет получить более точные и достоверные результаты, поскольку насыщенные и ненасыщенные значения реактивностей взаимной индукции в схеме замещения электрической машины могут заметно различаться.

2. Модель возбудителя представляет из себя систему возбуждения синхронного генератора определенного типа. В рамках СГП учитывается возможность воспроизведения

наиболее перспективных в настоящий момент тиристорных и бесщеточных систем независимого возбуждения и самовозбуждения. Подобная модель возбудителя при наличии соответствующих исходных данных позволяет наиболее достоверно учитывать влияние типа системы возбуждения на функционирование СГ в составе ЭЭС, а также осуществлять анализ процессов в цепях системы возбуждения. Кроме того, детальное воспроизведение системы возбуждения предоставляет потенциальную возможность подключения реальных образцов АРВ и их тестирование в замкнутом цикле.

3. Модель АРВ представляет из себя наиболее полную и верифицированную модель управления возбуждением СГ и учитывает в себе основной канал регулирования напряжения СГ, каналы стабилизации, алгоритмы ограничения параметров режима, форсировки возбуждения и блокировок. При этом может осуществляться воспроизведение модели АРВ необходимой конфигурации и структуры. Воспроизведение быстродействующих АРВ в виде детальных моделей, в частности, при исследовании процессов в современных ЭЭС обусловлено выделением нового вида устойчивости, который относится к устойчивости систем с устройствами и генерирующими установками, подключаемыми к сети с помощью силовых преобразователей (объектами ВИЭ и устройствами ГСППТ). Быстродействующие САУ силовых преобразователей обозначенных объектов, определяющие в целом динамику их работы, взаимодействуют между собой и элементами традиционной части ЭЭС, обладающими малыми постоянными времени. Неправильная или несогласованная настройка как САУ обозначенных новых объектов, так и АРВ СГ приводит к возникновению незатухающих колебаний в ЭЭС разной частоты (от десятков Гц до единиц кГц) даже при малых возмущениях, которые в случае сложившихся схемно-режимных условий работы могут быть с возрастающей амплитудой и вызвать нарушение устойчивости ЭЭС. Таким образом для наиболее адекватного изучения процессов в современных ЭЭС, характер которых преимущественно определяется работой САУ различных элементов, необходимо их полное и детальное воспроизведение.

4. Мультимассная модель вала в виде модели с сосредоточенными параметрами позволяет адекватно воспроизвести характер движения ротора электрической машины и провести анализ крутильных колебаний при динамических возмущениях, сопровождающихся возникновением резонанса в электрической сети, что становится особенно актуальным для современных ЭЭС. Данный факт подтверждается выделением нового вида устойчивости, называемого устойчивостью к резонансам, который также подразделяется на электромеханический и электрический резонансы. В связи с этим необходимо адекватно воспроизводить реакцию традиционных СГ, поскольку при возникновении резонанса диапазон колебаний может варьироваться в широком диапазоне частот в зависимости от схемно-режимных условий работы ЭЭС, что обуславливает их неоднородную природу распространения по сети. Таким образом использование мультимассной модели вала позволяет достаточно точно изучать крутильные колебания, вызываемым резонансом, а также исследовать влияние на них переходных процессов при различного рода возмущениях и конфигурации ЭЭС в целом для выработки дальнейших мероприятий по исключению вероятности возникновения резонанса в электрической сети или эффективному демпфированию колебаний, в том числе путем соответствующей настройки АРВ СГ.

5. Модель регулятора турбины представляет из себя наиболее полную модель САУ СГ по отклонению частоты и/или мощности пропорционального типа с учетом статизма. При этом может осуществляться реализация модели регулятора необходимой configura-

ции и структуры. Воспроизведение подобной модели позволяет адекватно изучать длительные переходные процессы при различного рода возмущениях, которые, как правило, связаны с изменением частоты сети и абсолютной скорости вращения роторов СГ. В свою очередь моделирование длительных процессов позволяет комплексно рассматривать функции, возлагаемые на АРВ СГ, которые помимо регулирования возбуждения на начальных этапах переходного процесса заключаются также в ограничении режимных параметров СГ с выдержкой времени до нескольких минут.

6. В совокупности модели нагрузки собственных нужд и силового трансформатора обеспечивают условия подключения синхронного генератора к ЭЭС, максимально приближенные к реальным, что позволяет полно и достоверно воспроизводить процессы как в рамках энергоблока, так и во внешней ЭЭС, в которой используется подобная детальная и достаточно подробная модель.

Представленные средства используются для достижения адекватных результатов моделирования с применением ВМК РВ ЭЭС, необходимых для настройки АРВ СГ. При этом проведенная верификация разработанных средств гибридного моделирования энергоблока на основе сравнения с результатами моделирования, полученными с использованием коммерческого цифрового программно-аппаратного комплекса моделирования ЭЭС RTDS, показали совпадение при воспроизведении процессов в случае различных схемно-режимных условий работы энергоблока и возмущений в ЭЭС.

В третьей главе представлена методика настройки устройств АРВ СГ электрических станций, учитывающая особенности функционирования новых объектов генерации на базе ВИЭ и технологий ГСППТ при формировании перечня рассматриваемых режимов и возмущений, которые необходимы для выбора наиболее адекватной настройки регуляторов возбуждения и проверки ее эффективности. Причем рассмотрение определенных схемно-режимных условий и возмущений при проведении процедуры настройки АРВ обосновывается опытом эксплуатации объектов ВИЭ и устройств ГСППТ, отраженным в различных отечественных и зарубежных публикациях или материалах профильных конференций международного уровня, отчетах о функционировании ЭЭС и авариях в них, отечественных стандартах и сетевых кодексах ЭЭС зарубежных стран. В результате получены следующие положения методики:

1. На основе имеющейся исходной информации осуществляется подготовка математической модели ЭЭС с рассматриваемой электрической станцией, на которой установлены СГ с настраиваемыми устройствами АРВ. На данном этапе формируется описание математической модели ЭЭС необходимого масштаба и уровня детализации, на базе которой в последствие осуществляется настройка устройств АРВ.

2. Подготовка и формирование перечня рассматриваемых схемно-режимных условий работы ЭЭС и возмущений, необходимых для проведения настройки АРВ СГ и в дальнейшем для всесторонней оценки эффективности выбранных параметров настройки. При этом данный перечень включает в себя три основные группы режимов: базовые, характерные и специальные электрические режимы. При формировании характерных электрических режимов должны быть учтены:

- Различные уровни выдаваемой мощности объектов генерации на базе ВИЭ – от 0% до 100% относительно установленной (номинальной) мощности, что обуславливается резко переменным характером выработки электрической энергии подобного рода установками, поскольку установлено, что при изменении генерируемой ВИЭ

мощности в случае определенных схемно-режимных условий работы возможно нарушение устойчивости ЭЭС. Последнее обусловлено изменением в широких пределах в эксплуатационных режимах величины отношения короткого замыкания ($OKЗ$) в точке подключения ВИЭ к сети, которым определяются условия работы объекта ВИЭ в сильной или слабой сети согласно (1):

$$OKЗ = \frac{S_{КЗ}}{P_{ВИЭ}} \quad (1)$$

где $S_{КЗ}$ – мощность короткого замыкания системы в точке подключения ВИЭ к сети без учета влияния самого ВИЭ (МВА), $P_{ВИЭ}$ – мощность, выдаваемая ВИЭ (МВт). При значениях $OKЗ$ больше 3 о.е. сеть считается сильной, меньше 3 о.е. – слабой, следовательно, в таких условиях возможно нарушение устойчивой работы ВИЭ, что может повлиять на эффективность настройки АРВ СГ.

- Различные ремонтные схемы, предполагающие изменение результирующего сопротивления линии электропередачи (линии связи), с помощью которой осуществляется подключение ВИЭ к внешней электрической сети. При этом в соответствии с (1) происходит изменение $S_{КЗ}$ системы и коэффициента $OKЗ$ в целом. С целью изменения $S_{КЗ}$ системы в точке подключения ВИЭ, также могут учитываться ремонтные схемы, предполагающие вывод в ремонт участков линий электропередач, шунтирующих связей, параллельных трансформаторов на подстанциях, других источников генерации в рассматриваемом энергорайоне.
- Изменение степени компенсации продольного сопротивления линий электропередачи, отходящих от рассматриваемой электростанции или находящихся в непосредственной близости к ней, а также режимы, предполагающие выдачу мощности ВИЭ через последовательно подключенную линию электропередачи с продольной компенсацией при отключенных других связях, поскольку необходимым становится определение условий возникновения резонанса в электрической сети и эффективности работы АРВ СГ при данном явлении.
- Различные уровни загрузки по реактивной мощности статических компенсаторов реактивной мощности (СТАТКОМ) при изменениях схемно-режимных условий работы ЭЭС, поскольку по аналогии с ВИЭ установлено, что работа СТАТКОМ оказывает влияние на возникновение субсинхронных колебаний даже в сетях без продольной компенсации.

В рамках предлагаемой в диссертационной работе методики настройки АРВ сформированы рекомендации по рассмотрению специальных электрических режимов, при которых предполагается:

- Рассмотрение различных уровней выдачи мощности объектами ВИЭ при изменении параметров настройки (полосы пропускания) блока фазовой автоподстройки частоты и внутреннего контура управления током в структуре их САУ, поскольку именно данные элементы системы управления определяют характер и условия возникновения колебаний в широком диапазоне частот по причине нарушения устойчивости ВИЭ, в связи с чем необходима дополнительная проверка эффективности работы АРВ СГ и их возможностей по демпфированию возникающих колебаний.
- По аналогии с предыдущим пунктом рассматривается изменение настроек устройств ГСППТ с силовыми преобразователями, например, для СТАТКОМ или линии постоянного тока, при различных схемно-режимных условиях работы ЭЭС.

- Учет в системе управления ВИЭ алгоритма работы СТАТКОМ, исходя из чего объект ВИЭ может выступать в качестве оперативного динамического источника реактивной мощности при малом уровне генерации активной мощности ВИЭ по причине погодных условий или времени суток, а также при искусственном ограничении выработки по разным причинам. Подобное свойство ВИЭ позволяет значительно расширить перечень системных функций, которые они способны выполнять, особенно в рамках регулирования напряжения и его поддержания при больших возмущениях. В данном режиме оценивается эффективность совместной работы ВИЭ и традиционной генерации с настраиваемыми устройствами АРВ, а также могут быть выработаны определенные рекомендации по их настройке.

После подготовки перечня рассматриваемых режимов для каждого из них определяются возмущения различного типа, интенсивности и места приложения в ЭЭС, необходимые для проверки правильности и оценки эффективности настройки АРВ СГ. При подготовке списка рассматриваемых возмущений они могут быть разделены на три группы: тестовые, нормативные и ненормативные. Набор тестовых возмущений изложен в стандарте АО «СО ЕЭС», устанавливающем требования к системам возбуждения и автоматическим регуляторам возбуждения сильного действия синхронных генераторов. При проведении расчетов режимов нормативные возмущения формируются на основе Методических указаний по устойчивости энергосистем. Ненормативные возмущения на данный момент не отражены в существующей нормативно-технической документации, однако они являются характерными для современных ЭЭС с ВИЭ:

- Отключение объектов генерации на базе ВИЭ в соответствии с требованиями о недопустимости отключения генерирующих установок при низком напряжении регламентированной длительности: в системе управления ВИЭ учитывается функция или характеристика LVRT (*Low Voltage Ride Through*).
- Кратковременное отключение объектов генерации на базе ВИЭ с их последующим обратным включением в сеть в соответствии с характеристикой LVRT.
- Отключение объектов генерации на базе ВИЭ в соответствии с требованиями о недопустимости отключения генерирующих установок при повышении напряжения регламентированной длительности: в системе управления ВИЭ учитывается функция или характеристика HVRT (*High Voltage Ride Through*).
- Отключение объектов генерации на базе ВИЭ без возмущений, что является достаточно частым явлением на практике, которое может быть вызвано ошибочным срабатыванием защиты системы охлаждения силовых ключей или цепи постоянного тока.

3. Воспроизведение совокупной математической модели ЭЭС в средствах, используемых для осуществления предварительной настройки устройств АРВ СГ, в рамках их свойств и возможностей. Преимущественно на данном этапе используется статическая (линеаризованная) модель ЭЭС. Определение предварительных параметров настройки регулятора напряжения, каналов внутренней и внешней стабилизации для АРВ отечественного типа или системного стабилизатора для зарубежных АРВ. В качестве методов для нахождения предварительных параметров настройки АРВ СГ могут быть использованы: метод *D*-разбиения, метод корневого годографа, частотные методы анализа, различные методы оптимизации (алгоритм роя частиц, муравьиный алгоритм, алгоритм стаи волков и др.) и т.д.

4. Воспроизведение совокупной математической модели ЭЭС в средстве моделирования электромагнитных переходных процессов (в рамках диссертационной работы для этой цели предлагается использовать ВМК РВ ЭЭС), включающей в себя модели генерирующего, сетевого оборудования, нагрузки, объектов ВИЭ, устройств ГСПИТ и их САУ и САУ с необходимым и достаточным уровнем детализации на основе имеющейся исходной информации, для осуществления настройки устройств АРВ с применением динамической модели ЭЭС. На данном этапе осуществляется последовательный расчет электромагнитных переходных процессов в схемно-режимных условиях, определенных в соответствии с пунктом 2 предлагаемой методики. Таким образом рассматриваются конкретные режимы работы ЭЭС в полной, ремонтных и послеаварийных схемах при возникновении ряда возмущений, которые также сформированы по пункту 2 методики. Далее на основе полученных осциллограмм изменения параметров электрического режима осуществляется количественная оценка эффективности параметров настройки АРВ СГ в соответствии с критериями оценки. В качестве рассматриваемых критериев в диссертационной работе предлагается использовать широко известные из теории автоматического управления интегральные показатели качества переходных процессов. При этом подразумевается применение сразу нескольких интегральных показателей, которые определяются в соответствии с (2)–(4):

$$ISE = \int_{t=0}^{T=t_{зад}} e^2(t) dt \quad (2)$$

$$ISTES = \int_{t=0}^{T=t_{зад}} (t^2 \cdot e(t))^2 dt \quad (3)$$

$$ISTSE = \int_{t=0}^{T=t_{зад}} t^2 \cdot e^2(t) dt \quad (4)$$

где: $e(t)$ – отклонение величины рассматриваемого параметра электрического режима от его установившегося значения после возмущения; t – момент времени рассматриваемого процесса; ISE – интегральный показатель по квадрату ошибки; $ISTES$ – квадратичный интегральный показатель по квадрату времени и квадрату ошибки; $ISTSE$ – интегральный показатель по квадрату времени и квадрату ошибки.

Интегральный показатель ISE является наиболее простым и понятным количественным критерием для оценки амплитуды возникающих колебаний параметров электрического режима, для которого чем меньше результирующее значение, тем лучше стабилизация режима. Показатели $ISTES$ и $ISTSE$ за счет добавления величины времени к модулю отклонения величины контролируемого параметра от его установившегося значения позволяют оценить эффективность демпфирования, т.к. умножение отклонения на время дает наибольшие значения на конечной стадии переходного процесса, чем в его начале после возмущения. Кроме того, поскольку в данные показатели входит величина отклонения, максимальная величина перерегулирования получается меньше, чем меньше их полученное значение. Также показатели $ISTES$ и $ISTSE$ учитывают время с разными значениями степени, что обуславливает меньшее время нарастания и установления переходного процесса, а также минимальное значение перерегулирования. Однако меньшие значения $ISTES$ и $ISTSE$ могут достигаться при больших регулирующих воздействиях самого устройства АРВ. Таким образом комплексная оценка выбранных параметров настройки АРВ СГ осуществляется на основе анализа полученных значений всех представленных интегральных показателей: чем они меньше, т.е. ближе к нулю, тем больше эффективность демпфирования колебаний АРВ как при малых, так и при наиболее тяжелых возмущениях.

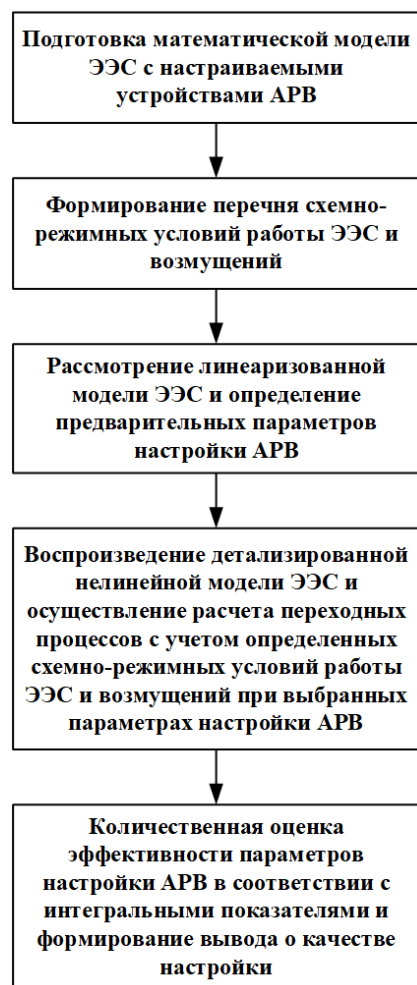


Рис. 2. Блок-схема методики настройки АРВ СГ.

АРВ, второй – согласно предлагаемой в диссертации методике. Далее в результате оценки качества заданных параметров настройки АРВ на динамической модели ЭЭС было получено, что второй набор параметров обеспечивает наименьшие значения амплитуды и времени затухания возникающих колебаний параметров электрического режима при возмущениях (рисунки 4–5), а также необходимые запасы колебательной и динамической устойчивости во всех рассматриваемых схемно-режимных условиях работы ЭЭС. При этом данный

В то же время по аналогии с существующей методикой настройки регуляторов возбуждения дополнительно предлагается производить количественную оценку времени затухания возникающих колебаний. Оценка времени затухания позволяет верифицировать результаты и выводы, полученные на основе анализа предлагаемых выше интегральных показателей. Совместное использование обозначенных выше критериев позволяет в динамике рассматривать их изменение в зависимости от режима работы генератора и типа возмущения в сети с целью дальнейшей оценки эффективности настройки АРВ СГ в широком многообразии схемно-режимных условий работы современных ЭЭС с ВИЭ и ГСППТ в целом. На рисунке 2 приведена в обобщенном виде блок-схема методики настройки АРВ СГ электрических станций.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований, проведенных в соответствии с предлагаемой методикой настройки устройств АРВ СГ, подтверждающие свойства и возможности разработанных средств. Экспериментальные исследования производились на примере тестовой схемы ЭЭС, которая реализована на основе реального энергорайона Восточной Сибири (рисунк 3). При этом с применением метода D -разбиения изначально были получены два набора параметров настройки каналов системной стабилизации АРВ: первый – в соответствии с классической методикой настройки

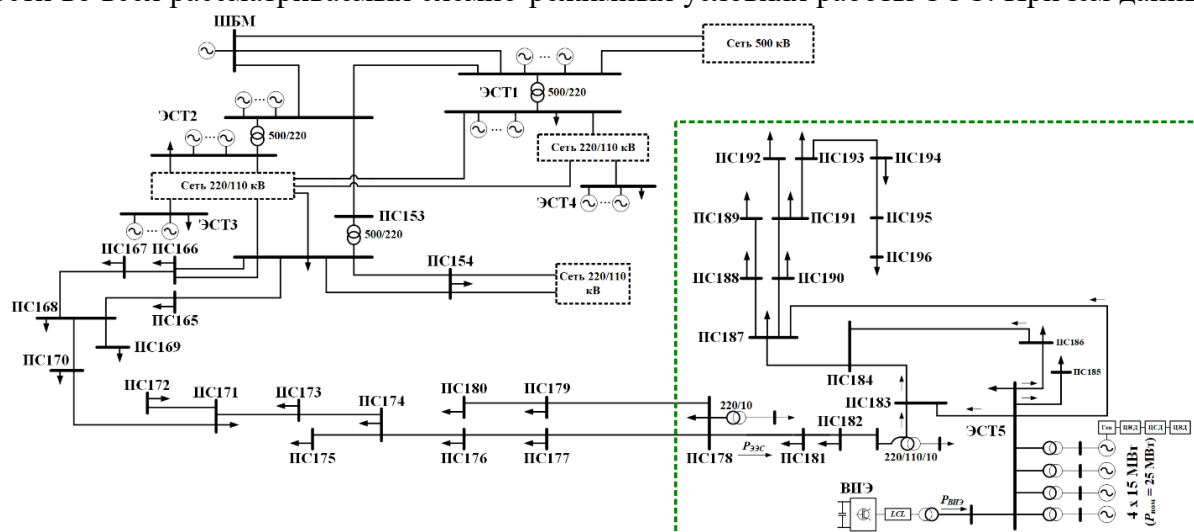


Рис. 3. Схема тестовой ЭЭС.

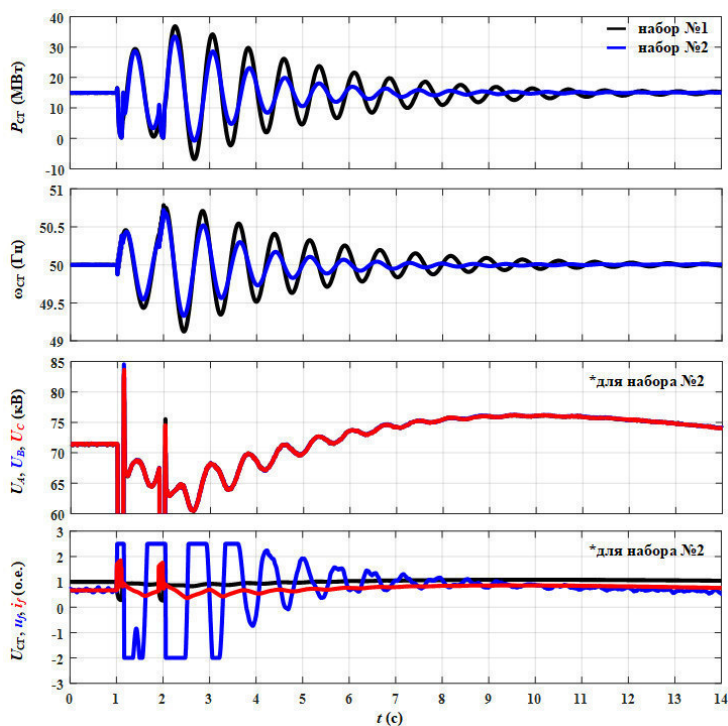


Рис. 4. Осциллограммы процессов в случае трехфазного короткого замыкания с неуспешным трехфазным автоматическим повторным включением при мощности ВИЭ равной 70% от установленной.

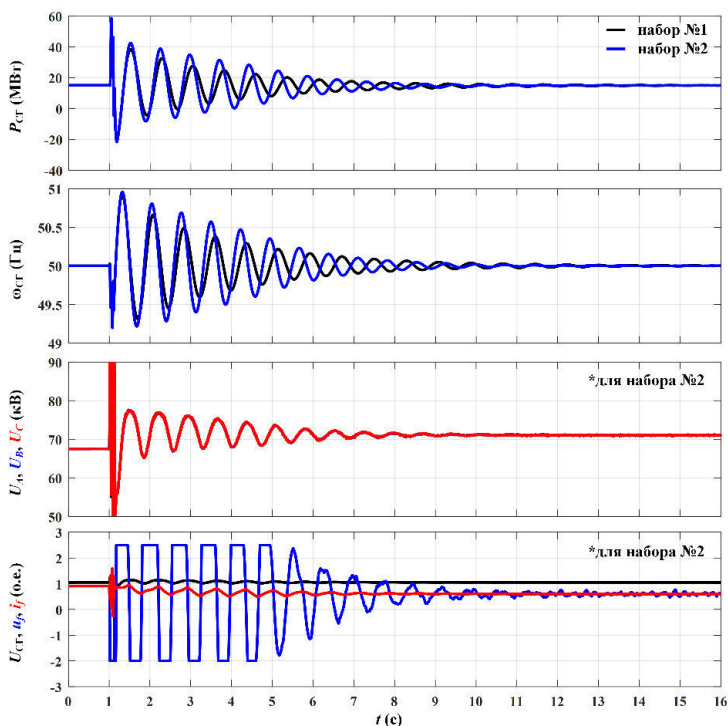


Рис. 5. Осциллограммы процессов в случае несинхронного включения ВИЭ при его мощности равной 100% от установленной.

рования, что обусловлено учетом дополнительных схемно-режимных условий, характерных для объектов ВИЭ и устройств ГСППТ. Кроме того, при учете ряда специальных режимов, а также ненормативных возмущений возможно проведение комплексной оценки правильности и эффективности выбранных параметров настройки АРВ на динамической

вывод был получен за счет анализа качества переходных процессов с помощью предлагаемых интегральных показателей, которые позволяют анализировать протекающие процессы в целом на заданном интервале времени. Также было выявлено, что при использовании первого набора параметров настройки АРВ возможно возникновение режимов с демпфированием послепаварийных электромеханических колебаний за время более 15 секунд, а также с наличием слабозатухающих колебаний параметров электрического режима при ненормативных возмущениях. Таким образом подобные параметры настройки АРВ СГ могут быть признаны неэффективными. В то же время выбранные параметры настройки АРВ СГ, соответствующие второму набору параметров, обеспечивают эффективное демпфирование электромеханических переходных процессов на частоте колебаний ротора СГ и не приводят к нарушению устойчивости работы СГ.

На основе полученных результатов моделирования и расчета критериев оценки эффективности параметров настройки АРВ СГ на примере конкретной модели ЭЭС, которые частично представлены в подразделах данной главы, могут быть сделаны следующие выводы:

1. В результате применения предлагаемой методики настройки становится возможным получить параметры настройки каналов системной стабилизации АРВ СГ, адекватные условиям их функциони-

модели ЭЭС, что позволяет заключить о характере переходных процессов и возможности возникновения нарушения устойчивости.

2. При рассмотрении эффективности работы АРВ с разными параметрами настройки, полученными с помощью традиционной (первый набор) и предлагаемой (второй набор) методики, можно сделать однозначный вывод о большей эффективности второго набора параметров, что доказывается за счет использования дополнительных критериев при количественной оценке эффективности работы АРВ в виде совокупности интегральных показателей. Данные показатели позволяют сделать комплексный вывод о качестве переходных процессов в целом на заданном интервале времени – величине амплитуды колебаний и времени их затухания. При этом на основе анализа полученных результатов могут быть сформированы интервалы количественных значений, соответствующие определенным качественным характеристикам эффективности настройки устройств АРВ (таблица 1).

Таблица 1. Интервалы значений интегральных показателей для оценки качества настройки АРВ СГ

Показатель	Качество настройки			
	крайне эффективная	эффективная	неэффективная	возможны слабо-затухающие колебания
<i>ISE</i>	0 – 0,02	0,02 – 0,4	0,4 – 0,7	>0,7
<i>ISTES</i>	0 – 1	1 – 250	250 – 1000	>1000
<i>ISTSE</i>	0 – 0,05	0,05 – 15	15 – 50	>50

3. В случае использования первого набора параметров для каналов системной стабилизации АРВ, который получен с помощью применения метода *D*-разбиения и традиционной методики настройки, возможны случаи, когда демпфирование послеаварийных электромеханических колебаний на частоте ротора СГ при введенных каналах стабилизации в конкретных рассматриваемых режимах при ненормативных возмущениях, воспроизводящих более тяжелые аварийные ситуации, осуществляется за время более 15 секунд, либо может даже происходить возникновение слабозатухающих колебаний параметров электрического режима. Таким образом подобные параметры настройки АРВ СГ могут быть признаны неудовлетворяющими требования стандарта АО «СО ЕЭС» и должны быть скорректированы. Корректировка возможна за счет применения предлагаемой в диссертационной работе методики настройки АРВ СГ, на основе которой получены параметры настройки, обеспечивающие уменьшение амплитуды и времени затухания электромеханических переходных процессов, а также необходимые запасы колебательной и динамической устойчивости во всех рассматриваемых схемно-режимных условиях работы ЭЭС.

4. При рассмотрении отдельных режимов, которые подразумевают изменение схемно-режимных условий работы СГ за счет изменения условий подключения объектов ВИЭ, параметров настройки их САУ, а также разной степени продольной компенсации в ближайшей электрической сети, что может становиться причиной нарушения устойчивости в результате появления колебаний параметров электрического режима в широком диапазоне частот, выявлено, что выбранные параметры настройки АРВ СГ, соответствующие второму набору параметров, по аналогии с другими рассматриваемыми случаями обеспечивают эффективное демпфирование электромеханических переходных процессов на частоте колебаний ротора СГ и не приводят к нарушению устойчивости работы СГ по причине его раскачивания или взаимодействия с возникающими колебаниями.

5. За счет применения дополнительных мероприятий по увеличению возможностей управления и устойчивости ВИЭ в целом, заключающихся в использовании алгоритма ВИЭ-СТАТКОМ, изменении настроек САУ ВИЭ и введении каналов стабилизации в контур по управлению реактивной мощностью ВИЭ, осуществляется значительное улучшение условий демпфирования колебаний, а также увеличение запасов динамической устойчивости самого объекта ВИЭ, что подтверждается результатами проведенных экспериментальных исследований. При этом показано, что выбранные параметры настройки АРВ СГ являются также адекватными для рассматриваемых случаев и не приводят к возникновению колебаний с увеличивающейся амплитудой. Кроме того, для случая с использованием дополнительных каналов стабилизации в контуре по управлению реактивной мощностью САУ ВИЭ получено, что при скоординированной настройке АРВ СГ и САУ ВИЭ возможно многократное улучшение условий демпфирования колебаний в сравнении со случаем без использования подобных каналов стабилизации. Таким образом при корректировке параметров настройки каналов стабилизации для ВИЭ достигается существенное увеличение эффективности демпфирования колебаний параметров электрического режима при различных возмущениях и схемно-режимных условиях работы ЭЭС за счет использования возможностей как традиционных, так и новых объектов генерации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Проведен анализ влияния внедрения в существующие ЭЭС современных объектов генерации на базе ВИЭ и устройств ГСППТ различного типа, в том числе подключаемых к электрической сети с помощью силовых преобразователей, на динамику протекания переходных процессов и устойчивость современных ЭЭС в целом.

2. В качестве решения проблемы обеспечения надежности и устойчивости современных ЭЭС в диссертационной работе проанализирована возможность применения АРВ СГ электрических станций, поскольку данная режимная автоматика отвечает за функционирование как СГ, так и всей ЭЭС в целом в нормальных и переходных режимах, а также обладает необходимым потенциалом и свойствами как для повышения эффективности демпфирования колебаний, так и для обеспечения высоких запасов колебательной и динамической устойчивости.

3. Выполнен анализ существующих направлений в области развития систем регулирования возбуждения СГ, а также совершенствования подходов к их настройке, на основании которого выявлены и обоснованы сложности применения устройств АРВ с нелинейной структурой, добавления новых каналов стабилизации или сигналов регулирования, а также факторы, препятствующие комплексному решению проблемы настройки устройств АРВ в современных ЭЭС в рамках применения существующих и перспективных методов и средств.

4. Для комплексного решения проблематики настройки АРВ СГ в современных ЭЭС с ВИЭ и ГСППТ в диссертационной работе предложено использовать средства для математического моделирования электромагнитных переходных процессов в ЭЭС, необходимые для осуществления адекватной настройки АРВ и позволяющие осуществлять воспроизведение ЭЭС реальных размерностей без их значительного эквивалентирования с учетом детальных моделей различных устройств и объектов в их составе. В качестве основы таких средств выступает ВМК РВ ЭЭС, разработанный с применением концепции гибридного моделирования, объединяющей в себе аналоговый, цифровой и физический подходы к мо-

делированию ЭЭС, что позволяет исключить декомпозицию режимов и процессов, упрощение математических моделей элементов и совокупной модели ЭЭС в целом, ограничение интервала воспроизведения процессов, а также проблему сходимости итерационного процесса.

5. Разработана теоретически и практически обоснованная концепция осуществления настройки АРВ СГ с учетом современных тенденций развития и модернизации ЭЭС на основе применения средств моделирования электромагнитных переходных процессов, в частности ВМК РВ ЭЭС, на этапе проверки предварительно выбранных параметров настройки АРВ на динамической модели ЭЭС. Сформированные положения концепции позволяют комплексно оценить влияние интеграции различного рода объектов ВИЭ и устройств ГСППТ на эффективность функционирования АРВ СГ, а также провести необходимые мероприятия по корректировке и оптимизации параметров настройки устройств АРВ для обеспечения качественного управления режимами, необходимой эффективности демпфирования колебаний и уровня устойчивости ЭЭС в целом. Подобные свойства концепции обеспечиваются за счет возможности получения наиболее полной и достоверной информации о режимах и процессах в современных ЭЭС.

6. Разработаны с применением положений гибридного моделирования необходимые программно-аппаратные средства реализации СГП энергоблока, совместимого с ВМК РВ ЭЭС, который позволяет при настройке АРВ СГ детально учитывать модели электрической машины с учетом возможности задания мультимассности вала, системы возбуждения, современных устройств АРВ любого типа и исполнения, первичного двигателя и его систем автоматического регулирования, нагрузки собственных нужд и силового блочного трансформатора.

7. Сформированы положения методики настройки устройств АРВ СГ, учитывающие особенности функционирования новых объектов генерации на базе ВИЭ и устройств ГСППТ при формировании математической модели ЭЭС, на которой осуществляется настройка устройств АРВ, а также перечня рассматриваемых конкретных режимов и возмущений, которые необходимы как для выбора правильной и оптимальной настройки регуляторов возбуждения, так и для адекватной проверки ее эффективности. В рамках методики также обосновано применение дополнительных критериев оценки эффективности выбранных параметров настройки АРВ СГ, что заключается в расчете совокупности интегральных показателей качества переходных процессов.

8. Выполнен комплекс экспериментальных исследований, подтверждающий эффективность разработанной методики настройки АРВ СГ электрических станций при внедрении объектов ВИЭ и устройств ГСППТ в современные ЭЭС, а также доказывающий необходимость использования дополнительных критериев оценки качества выбранных параметров настройки АРВ для формирования однозначного вывода об их правильности и эффективности в различных схемно-режимных условиях работы ЭЭС в целом.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Аскарлов А.Б. Верификация расчётов динамической устойчивости энергорайонов с распределёнными генерирующими объектами / А.А. Суворов, А.Б. Аскарлов, М.В. Андреев, В.Е. Рудник // Электрические станции. – 2021. – № 10 (1083). – С. 12–25.

2. **Аскаров А.Б.** Разработка гибридных средств моделирования для проведения настройки автоматических регуляторов возбуждения в условиях развития электроэнергетических систем / А.Б. Аскаров, М.В. Андреев, Е.М. Чикишев, А.А. Суворов, В.Е. Рудник // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2021. – № 38. – С. 148–174.
3. **Аскаров А.Б.** Современные направления развития систем автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов электростанций / А.Б. Аскаров, М.В. Андреев, Е.М. Чикишев, А.А. Суворов, В.Е. Рудник // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2021. – № 39. – С. 54–79.
4. **Аскаров А.Б.** Анализ влияния возобновляемых источников энергии с силовыми преобразователями на процессы в современных энергосистемах / Н.Ю. Рубан, А.Б. Аскаров, М.В. Андреев, А.В. Киевец, В.Е. Рудник // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – № 36. – С. 7–30.
5. **Аскаров А.Б.** Применение Всережимного моделирующего комплекса для энергосистем с распределенной генерацией / А.Б. Аскаров, А.А. Суворов, М.В. Андреев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2019. – Т. 23. – № 1(144). – С. 75–89.
6. **Аскаров А.Б.** Анализ возможности применения Всережимного моделирующего комплекса реального времени электроэнергетических систем в качестве программно-аппаратного комплекса настройки и сертификации автоматических регуляторов возбуждения / А.Б. Аскаров, Н.Ю. Рубан, М.В. Андреев, Р.А. Уфа, А.А. Суворов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21. – № 9(128). – С. 114–124.

Публикации в изданиях, входящих в реферативные базы Scopus и Web of Science:

1. **Askarov A.** Hybrid tools of generating unit simulation for proper tuning of automatic voltage regulators: concept, development and validation / A. Askarov, M. Andreev, A. Gusev, V. Rudnik // Electrical Engineering. – 2022. – Vol. 104 (3). – P. 1591–1606.
2. **Askarov A.B.** Validation of Positive-Sequence Modeling of Large-Disturbance Stability in a Distribution Network with Distributed Generation Using the Hybrid Comprehensive Simulator / A.A. Suvorov, A.B. Askarov, M.V. Andreev, A.S. Gusev // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 65216–65233.
3. **Askarov A.** Potential Application of HRTSim for Comprehensive Simulation of Large-Scale Power Systems with Distributed Generation / A. Suvorov, A. Gusev, N. Ruban, M. Andreev, A. Askarov, R. Ufa, I. Razzhivin, A. Kievets, J. Bay // International Journal of Emerging Electric Power Systems. – 2019. – Vol. 20 (5). – 20190075.

Публикации в сборниках статей и трудах конференций:

1. **Аскаров А.Б.** Настройка систем автоматического регулирования генерирующих установок с применением концепции гибридного моделирования для обеспечения надежного электроснабжения объектов нефтегазовой промышленности / А.Б. Аскаров, Р.В.

Мицкевич, М.В. Андреев // Сборник научных трудов XXV Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию горно-геологического образования в Сибири, 125-летию со дня основания Томского политехнического университета «Проблемы геологии и освоения недр». – 2021. – С. 156–157.

2. **Аскаров А.Б.** Оценка влияния установки возобновляемых источников энергии на процессы в электроэнергетических системах / А.Б. Аскаров, М.В. Андреев // Сборник научных трудов Всероссийской научной конференции с международным участием и XII научной молодежной школы «Возобновляемые источники энергии». – 2020. – С. 144–148.

3. **Аскаров А.Б.** Формирование средств настройки автоматических регуляторов возбуждения на основе гибридного моделирования / А.Б. Аскаров, М.В. Андреев, Н.Ю. Рубан, А.А. Суворов // Сборник научных трудов XI Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи – 2020». – 2020. – С. 265–266.

4. **Askarov A.** Impact assessment of full-converter wind turbine generators integration on transients in power systems / A. Askarov, M. Andreev, N. Ruban // AIP Conference Proceedings. – 2020. – Vol. 2212. – 020005.

5. **Askarov A.** Application of hybrid hardware-software simulator for automatic voltage regulators setting / A. Askarov, M. Andreev, I. Chesnokova // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2135. – 020006.

6. **Askarov A.B.** Universal Testbed for Algorithm Researches and Setting of Relay Protection and Automation in Power Systems with Distributed Generation and Renewable Energy Sources / A.B. Askarov, N.Y. Ruban, M.V. Andreev, R.A. Ufa, A.A. Suvorov // 2018 International Youth Scientific and Technical Conference Relay Protection and Automation. – 2018. – 8537233.

7. **Аскаров А.Б.** Анализ возможностей Всережимного моделирующего комплекса реального времени электроэнергетических систем в качестве программно-аппаратного комплекса сертификации устройств АРВ и АЛАР / А.Б. Аскаров, Н.Ю. Рубан, М.В. Андреев // Сборник научных трудов VIII Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи – 2017». – 2017. – С. 365–368.