

На правах рукописи



Ивкин Ефим Сергеевич

**Системная автоматика для создания локальных интеллектуальных
энергосистем и управления их режимами**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и
электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Фишов Александр Георгиевич,**
доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты: **Илюшин Павел Владимирович,**
доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт энергетических исследований Российской академии наук, Центр интеллектуальных электроэнергетических систем и распределенной энергетики, руководитель Центра;

Кузнецов Олег Николаевич,
кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ", кафедра Электроэнергетических систем, доцент.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург).

Защита диссертации состоится «27» декабря 2021 года в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

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

Автореферат разослан «__» ноября 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
канд. техн. наук, доцент

Анатолий Анатольевич Осинцев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Одно из важнейших направлений формирования образа современной энергетики является применение малой генерации (МГ) для децентрализации производства электроэнергии с использованием концепции мультиагентного автоматического управления. Необходимой технологией, позволяющей достичь значительных результатов в данном направлении, является технология создания множества Локальных интеллектуальных энергосистем (ЛИЭС или MiniGrid) и интеграция их в существующие централизованные электрические сети. Данная технология позволяет устранить локальные дефициты электрической мощности, снизить потери электроэнергии, связанные с ее передачей на большие расстояния, обеспечить высокую надежность энергоснабжения, в том числе, за счет живучести системы энергоснабжения, обеспечить короткие сроки ввода мощностей и окупаемости объектов генерации.

Актуальность темы исследования обусловлена ростом количества объектов с малой генерацией и стремлением их собственников к подключению этих объектов к распределительным электрическим сетям Единой энергетической системы (ЕЭС) и включению их на параллельную работу, т.к. островная работа таких объектов, как правило, не соответствует требованиям надежности, качества электроснабжения потребителей и экономичности энергопроизводства.

Для решения данной задачи необходима разработка и последующее использование специализированной интеллектуальной системной автоматики управления режимами такими MiniGrid, которая позволила бы упростить и существенно снизить затраты на интеграцию объектов с синхронной малой генерацией в существующие электрические сети ЕЭС, обеспечить выполнение требований к надежности, качеству электроснабжения потребителей и экономичности энергопроизводства.

Основная идея диссертационной работы - создание специализированной комплексной автоматики управления режимами MiniGrid, обеспечивающей выполнение требований к «свободному» (Plug and Play) и малозатратному их присоединению к внешним электрическим сетям за счет их прямого включения в сеть посредством синхронных связей без централизации управления на идеологии мультиагентных систем.

Комплексность обеспечивается решением в полном объеме задач противоаварийного, режимного управления и автооперирования MiniGrid в увязке с техническими решениями в части схемы выдачи мощности и дополнительного оборудования, обеспечивающих удовлетворение существующих требований к объектам генерации, интегрируемым с ЕЭС. В результате в составе распределительных электрических сетей возникает качественно новый “беспилотный”, т.е., работающий в полностью автоматическом режиме объект – MiniGrid.

Степень разработанности темы исследования. Тематика научных работ в области распределенной генерации и интеллектуальных энергосистем в России на сегодняшний день довольно разнообразна. Среди основных научных направлений исследований в этой области можно выделить следующие: проблемы и перспективы развития малой генерации в России, синхронизация объектов малой генерации и локальных систем энергоснабжения

(ЛСЭ) с внешней сетью, использование малой генерации в системах электроснабжения промышленных предприятий, влияние распределенной генерации на электрическую сеть, планирование режимов сетей с объектами МГ и др. Значительный вклад в развитие данного направления внесли множество исследователей, среди которых: Воропай Н.И., Илюшин П.В., Куликов А.Л., В.И., Паздерин А.В., Обоскалов В.П., Марченко А.И., Андреев М.В., Фёдоров В.К., Фишов А.Г., Бык Ф.Л., Армеев Д.В., Бердин А.С., Шубин Н.Г., Булатов Ю.Н., Бушуева О.А., Глазырин Г.В., Гуломзода А.Х., Дехтерев А.И., Ерохин П.М., Ерошенко С. А, Исмоилов С.Т., Какоша Ю.В., Кац П.Я., Короткевич М.А., Кубарьков Ю.П., Курбацкий В.Г., Ландман А.К., Мукатов Б.Б., Мышкина Л.С., Нагай Пантелеев В.И., Петрищев А.В., Рогозинников Е. И., Семендяев Р.Ю., Суворов А.А., Тутундаева Д.В., Фахразиева И. З., Фролов М.Ю., Фурсанов М.И., Шиллер М.А., Чершова В.О., Эрдэнэбат., и др.

Стоит отметить, что зарубежом тематика исследований в области распределенной генерации и интеллектуальных энергосистем смещена в сторону возобновляемых источников энергии. Развитием данной темы занимаются следующие исследователи: Jon Are Suul, H. Bevrani, S. Chowdhury, M.Dai, L. Soder, Olav B. Fossob, T. Ise, J. Barton, D. Emmanuel-Yusuf, S. Hall, V. Johnson, A. O'Grady, F. Pilo, A. Wood и др.

Целью диссертационной работы является разработка системной автоматики для локальных интеллектуальных энергосистем (MiniGrid) с синхронной малой генерацией и ее применения на реальных объектах.

Задачи для достижения цели диссертационной работы:

1. Анализ особенностей работы локальных систем электроснабжения на основе синхронной малой генерации в островном и параллельном с энергосистемой режимах;
2. Разработка технических решений для создания на основе локальных систем электроснабжения с синхронной МГ MiniGrid и управления их режимами с помощью специальной системной автоматики;
3. Исследование взаимодействия и согласование настроек автоматики MiniGrid с автоматикой энергоблоков;
4. Разработка и реализация в виде программного обеспечения (ПО) для программно-технического комплекса (ПТК) полного состава алгоритмов системной автоматики MiniGrid;
5. Реализация системной автоматики на физических моделях MiniGrid (НГТУ, НИУ МЭИ);
6. Разработка программ и методик испытаний системной автоматики MiniGrid на реальном объекте для отладки и ввода в эксплуатацию;
7. Внедрение системной автоматики на реальном объекте;
8. Подготовка и проведение комплексных испытаний по вводу автоматики в работу с переводом MiniGrid ж/м Березовая (г. Новосибирск) в режим параллельной работы с внешней энергосистемой с полностью автоматическим режимом работы.

Объект исследования: системы электроснабжения на базе малой синхронной генерации, объединяемые на параллельную работу с внешней электрической сетью посредством синхронных электрических связей.

Предмет исследования: средства, способы и алгоритмы управления режимами автономной и параллельной с внешней сетью работы объектов с малой генерацией, а также переходами между ними.

Научная новизна диссертации:

1. Впервые разработан комплекс программно-аппаратных средств (системная автоматика) и технических решений, обеспечивающих создание и управление режимами MiniGrid;

2. Теоретически и экспериментально на физических моделях и реальном объекте исследовано применение разработанной системной автоматики и доказана его эффективность;

3. Разработаны методики и программы испытаний системной автоматики и функционирования MiniGrid в автоматическом режиме.

Теоретическая и практическая значимость работы. Решена научно-техническая задача по устранению рисков и технологических барьеров, возникающих в результате прямого подключения сбалансированных локальных энергосистем на основе малой генерации к централизованным электрическим сетям с созданием на их основе локальных интеллектуальных энергосистем по типу SmartGrid.

Запатентованный способ управление составом и загрузкой генерирующего оборудования электростанции MiniGrid реализован в системной автоматике управления режимом ее параллельной работы с внешней электрической сетью, созданной в НГТУ совместно с ООО «Модульные системы Торнадо» и ООО «Институт автоматизации энергетических систем».

Автоматика, практические рекомендации по ее применению, карты уставок и настройки, способы взаимодействия с блочной автоматикой генерирующих устройств (ГУ) использованы при осуществлении пилотного проекта по созданию и присоединению MiniGrid с мини теплоэлектроцентралью (мини ТЭЦ) жилого массива «Березовое» (г. Новосибирск) к электрической сети Новосибирской энергосистемы ЕЭС России с режимом параллельной работы и выдачей избыточных мощностей во внешнюю сеть.

Проведены комплексные испытания функционирования MiniGrid в автоматическом режиме и осуществлен ввод разработанной системной автоматики в эксплуатацию.

Методология и методы исследования. При выполнении работы использованы методы математического и физического моделирования, а именно моделирующие программно-вычислительные комплексы «Мустанг» и «RastrWin», физические комплексы «Электродинамическая модель электроэнергетических систем» Центра коллективного пользования «Центр испытаний устройств контроля и управления режимами электроэнергетических систем» НГТУ, кафедры Электроэнергетических систем НИУ МЭИ, MiniGrid жилмассива «Березовое» (г. Новосибирск). Используются теории устойчивости, управления режимами электроэнергетических систем, автоматического и

автоматизированного управления, экспериментальных исследований, методология SADT (Методология структурного анализа и проектирования).

Положения, выносимые на защиту:

1. Режимное и противоаварийное управление объектами с малой генерацией, включенными на параллельную работу в энергосистему, возможно без централизованного диспетчерского управления, автоматически за счет специальной автоматики и реализованных в ней инновационных способов управления режимами, обеспечивающих безопасную параллельную работу малой генерации и электрической сети энергосистемы;

2. Для эффективной работы MiniGrid в параллельном режиме необходима постоянная совместная работа «специальной» режимной автоматики и автооператора;

3. Управление режимами локальных энергосистем с синхронной малой генерацией должно быть полностью автоматическим;

4. Для синхронизации MiniGrid с другими MiniGrid или с централизованной энергосистемой необходимо использовать более жесткие условия синхронизации;

5. Безопасность режима выдачи избыточной мощности MiniGrid в приемную сеть может быть обеспечена с помощью запатентованного способа управления составом и загрузкой генераторов.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы», так как в диссертации рассматриваются вопросы развития и совершенствования теоретической и технической базы электроэнергетики с целью обеспечения более надежной и экономичной работы локальных систем энергоснабжения. В работе решены задачи, соответствующие следующим пунктам паспорта специальности 05.14.02:

- пункту 1 «Оптимизация структуры, параметров и схем электрических соединений электростанций, электроэнергетических систем и систем электроснабжения»;
- пункту 6 «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике»;
- пункту 9 «Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике».

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов подтверждена использованием промышленных программ для имитационного моделирования, выполнением физического моделирования энергосистем и испытаниями разработанной автоматики на физических моделях MiniGrid и реальном объекте, а также, при вводе автоматики в эксплуатацию.

Результаты исследования, полученные в ходе работы автором, докладывались и обсуждались на: международной конференции и выставке «Релейная защита и автоматика энергосистем», Санкт-Петербург, 2017 г., Москва, 2021 г., конференции филиала АО «СО ЕЭС» ОДУ Сибири, Кемерово, 2018 г., форуме «Глобальное технологическое лидерство», Сочи, 2019 г., а также на научных семинарах кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем НГТУ, ООО «Модульные системы Торнадо».

В составе научного коллектива автор диссертации принимал участие в выполнении двух НИОКР по гранту Национально-технологической инициативы «Развитие НТИ», а также в хозяйственной работе с АО «Россети Тюмень» по реализации предложенных технических решений в виде ПТК для системной автоматики MiniGrid.

Разработка является финалистом международного конкурса «Малая энергетика – большие достижения 2019» в номинации лучшая инновационная разработка года, а также получила высокую оценку по итогам рассмотрения на совместном заседании Научно-технического совета НП «НТС ЕЭС» и Секции Научного совета РАН по проблемам надёжности и безопасности больших систем энергетики, где признана имеющей отраслевое значение.

Проект удостоен диплома I степени (с вручением золотой медали) в конкурсе «Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка года» в номинации Лучший инновационный проект в области: энергосбережения, первичные и вторичные источники энергии, аккумуляторы, топливные элементы, солнечные батареи, ветрогенераторы, биотопливо, г. Санкт-Петербург, 2020 г.

Благодарность. Автор выражает свою глубокую благодарность сотрудникам кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем НГТУ, кафедры Электроэнергетических систем НИУ МЭИ, ООО «Модульные системы Торнадо», ООО «АльтероСмарт» и ООО «Генерация Сибири» за помощь в решении задач диссертации и содействие в реализации пилотного проекта MiniGrid.

Публикации. Результаты диссертационного исследования опубликованы в 8 научных работах, из них работ, опубликованных согласно перечня российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (перечень ВАК РФ) – 3, работ в научных изданиях, индексируемых базами Scopus и/или Web of Science – 2, получен патент на изобретение РФ. Также получены 2 акта, подтверждающих внедрение результатов исследования.

Личный вклад автора. Соискатель самостоятельно разрабатывал, реализовывал и отлаживал алгоритмы управления и графические интерфейсы системной автоматики MiniGrid для физических моделей НГТУ и НИУ МЭИ, MiniGrid жилмассива «Березовое», принимал непосредственное участие с долей не менее 50% в разработке комплексной программы испытаний готовности MiniGrid к включению на параллельную работу с сетью ЕЭС и программы проверки соответствия требованиям к участию энергоблоков ТЭЦ MiniGrid в общем первичном регулировании частоты (ОПРЧ) ЕЭС, проведении испытаний, подготовке заявки на изобретение, написании статей и подготовке докладов по результатам работы.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 65 наименований, списка сокращений и условных обозначений и двух приложений. Общий объем работы составляет 166 страниц и включает 58 рисунков и 24 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов, внедрение и апробация полученных результатов, сформулированы выносимые на защиту положения.

В первой главе представлены связанные с работой мировые тренды развития электроэнергетики, такие как открытые энергосистемы или производство энергии в местах его потребления, а также используемые в них понятия мировым сообществом. В России, из-за специфических особенностей, таких как масштабная газификация и потребности в большом количестве тепловой энергии, просматривается тренд развития газовой распределенной когенерации. Как итог появились локальные системы энергоснабжения с собственными объектами малой генерации, требующими «умное», не централизованное управление. Для обозначения таких сетей на западе было введено понятие SmartGrid, а в России, понятия, охватывающие это направление, были введены ФСК ЕЭС – *активно-адаптивная электрической сети* и Национальной технологической инициативой (НТИ) – *Локальные интеллектуальные энергосистемы (ЛИЭС), MiniGrid, Microgrid*. В работе под понятием *Локальная интеллектуальная энергосистема* или *MiniGrid* понимается локальная система энергоснабжения с источниками электрической энергии суммарной мощностью 1 - 25 МВт, подключенная к распределительной сети 6 - 110 кВ, способная работать под управлением автоматики, независимой от внешней системы, как автономно, так и параллельно с внешней сетью, а также устойчиво и безопасно переходить из режима автономной работы в параллельный и наоборот.

В главе приводятся восемь типов объектов с малой генерацией с различными назначениями и требованиями к системной автоматике и энергоисточнику, из которых выделяется ЛСЭ, имеющая недостатки автономной работы в виде низкой надежности электроснабжения потребителей и качества электроэнергии, которые можно устранить путем прямого подключения ЛСЭ к централизованной энергосистеме посредством синхронных связей, а именно созданию на базе ЛСЭ MiniGrid, способных работать, как автономно, так и параллельно с внешней сетью, т.е. быть интегрированными в общий баланс мощности и электрический режим. Однако такое подключение имеет барьеры и риски для оборудования:

1. Плохая электромеханическая совместимость вследствие малой механической инерции роторов энергоблоков МГ. Высокие риски возникновения опасных асинхронных режимов;
2. Риски возникновения недопустимых ударных моментов на валах энергоблоков МГ при проходящих коротких замыканиях (КЗ) в электрической сети;
3. Увеличение токов короткого замыкания, особенно подпитки со стороны внешней сети при КЗ в сети ЛСЭ;
4. Необходимость реконструкции средств релейной защиты и автоматики (РЗА) на подстанции присоединения объекта с малой генерацией;

5. Необходимость интеграции объекта с малой генерацией в систему внешнего оперативного управления;

6. Повышение требований к профессиональному уровню оперативного персонала системы энергоснабжения объекта с малой генерацией.

Следует также отметить отсутствие специализированной нормативной базы для включения MiniGrid на параллельную работу с сетями ЕЭС, использования системной автоматики для управления режимами MiniGrid, что является основными сдерживающими факторами их развития. Технология, устраняющая перечисленные риски и барьеры для MiniGrid является предметом исследования данной работы.

В качестве требований по безопасному поведению MiniGrid, как для оборудования внешней энергосистемы, так и для оборудования ЛЭС предлагается использовать опыт западных стран, отраженный в стандартах, применяемых к распределенной генерации. Так, например, стандартом IEEE 1547-2018 определяются предельно допустимые параметры для синхронного включения Minigrd с внешней энергосистемой, представленные в таблице 1. А стандарт ANSI C84.1 -1995 регламентирует реакцию автоматики MiniGrid на предельные отклонения напряжения и частоты от нормальных значений.

Таблица 1 – Предельно допустимые параметры для синхронного включения Minigrd с внешней энергосистемой

Суммарная мощность источника, кВА	Разница частот, Гц	Разница напряжений, %	Разница фазовых углов, °
> 500 – 1 500	0,2	5	15
> 1 500 – 10 000	0,1	3	10

Базовой идеей технологии MiniGrid, обеспечивающей ее живучесть, является опережающее сбалансированное отделение MiniGrid от внешней сети по фиксированным сечениям (деление до срабатывания релейной защиты (РЗ) внешней сети и энергоблоков малой генерации) при нарушениях нормального режима с переходом в островной режим и последующим автоматическим восстановлением синхронизма и нормального режима с требуемой нагрузкой оборудования.

Быстродействующее опережающее отделение MiniGrid по фиксированным сечениям позволяет:

- радикальным образом предотвратить возможность нарушения устойчивости параллельной работы генераторов тепловой электростанции (ТЭС) с сетью;
- полностью восстановить условия работы РЗ внешней сети после деления, соответствующие отсутствию подключения к сети MiniGrid, т.е. исключить необходимость изменения РЗА внешней сети;
- сохранить неизменными отключаемые выключателями токи КЗ (кроме выключателей в сечении);

- исключить возникновение на валах синхронных машин разрушительных динамических моментов из-за больших электромагнитных моментов, возникающих при восстановлении напряжения в сети после отключения КЗ с учетом выбега роторов генераторов.

На рисунке 1 представлены переходные процессы для работающей параллельной с внешней энергосистемой MiniGrid при проходящем внешнем КЗ с нарушением устойчивости и последующим погашением электростанции, нарушении электроснабжения потребителей при обычном управлении (а) и с устойчивым переходом в изолированный режим с сохранением электростанции и электроснабжения потребителей при опережающем сбалансированном отделении (б).

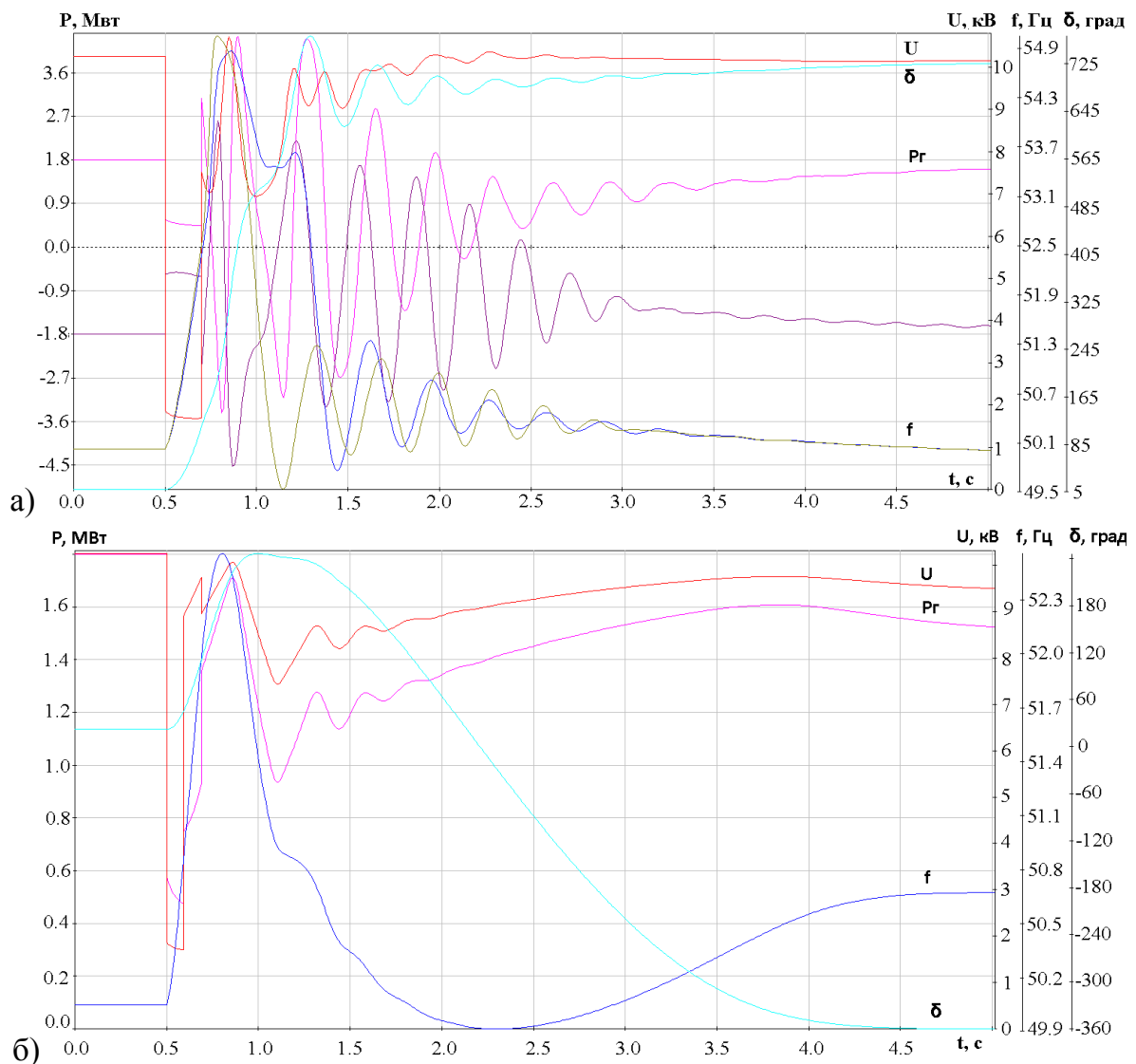


Рисунок 1 – Переходные процессы в MiniGrid при проходящем КЗ во внешней сети

При разработке системной автоматики MiniGrid следует выполнить существующие Требования к программно-техническому обеспечению и интерфейсам управляющих ПТК.

Система, обеспечивающая управление, планирование и мониторинг MiniGrid должна соответствовать ГОСТ 24.104-85 «Автоматизированные системы управления. Общие

требования». Порядок и стадии создания Системы не должны противоречить ГОСТ 34.601-90 «Автоматизированные системы. Стадии создания».

Компоненты ПТК должны иметь модульную структуру программного и аппаратного обеспечения для возможности быстрой замены неисправных частей, что обеспечивает простоту обслуживания и высокую степень готовности программно-технических средств.

ПТК MiniGrid должны функционировать в едином астрономическом времени, обеспечиваемом системой единого времени. Также должно быть обеспечено гарантированное время реакции системы на внешние события. Оперативное оповещение верхних уровней об аварийных событиях должно осуществляться с минимальной задержкой.

ПТК MiniGrid должны соответствовать принятым в отрасли требованиям по надежности – ГОСТ 24.701-86 ЕСС АСУ «Надежность автоматизированных систем управления. Основные положения».

Надежность системы должна основываться на:

- применении принципа распределенного управления;
- самодиагностике основных компонентов;
- резервировании наиболее ответственных частей.

Центр управления сетями (ЦУС) должен иметь возможность контролировать режим MiniGrid, определять и задавать для нее ограничения на обмен мощностью, запрашивать и использовать избыточные мощности MiniGrid для резервирования потребителей в основной электрической сети, использовать свободный регулировочный диапазон источников реактивной мощности MiniGrid для регулирования напряжения в своей электрической сети. Взаимодействие систем управления MiniGrid и ЦУС строится по иерархическому принципу, предполагающему внешнее управление MiniGrid ЦУСом электрической сети путем задания режимных ограничений и уставок по напряжению, перетоку мощности, эквивалентным статическим характеристикам по частоте и напряжению.

Во второй главе обоснованы и представлены технические решения, позволяющие при различных внешних и внутренних возмущениях сохранить в работоспособном состоянии оборудование электросетевого комплекса внешней энергосистемы и MiniGrid, газопоршневых (ГПУ) агрегатов ТЭЦ. Реализованные в ПТК и принятые технические решения позволяют обеспечить надежность электроснабжения электроприемников MiniGrid в различных схемно-режимных условиях, безопасность для оборудования за счет соответствующей функциональности, требуемых быстродействия, селективности и чувствительности работы устройств противоаварийной и режимной автоматики.

1. Для мониторинга синхронизма и синхронизации частей сети в ПТК используются синхронизированные векторные измерения в центрах питания MiniGrid.

2. Для предотвращения нарушений динамической устойчивости и возникновения опасных динамических ударных моментов на валах генераторов используется опережающее сбалансированное отделение MiniGrid по заранее подготовленным сечениям при нарушениях нормального режима с переходом отделяемой части в сбалансированный

по мощности островной режим с последующим автоматическим восстановлением синхронизма и нормального режима с требуемой нагрузкой оборудования.

3. В автономном режиме используются принципиальные схемы выдачи мощности, представленные на рисунке 2. Схемы предусматривают одностороннее отключение одной из линий L1 или L2, необходимость которого обусловлена требованием гарантированного исключения возможности несинхронизированного включения на параллельную работу энергоблоков ТЭЦ MiniGrid и внешней энергосистемы при срабатывании автоматического ввода резерва (АВР). Так, при исчезновении напряжения на шинах распределительного пункта (РП) АВР вначале отключит В8 в схеме а) или В7 в схеме б), а затем включит В9 или В10. После проверки отключенного состояния всех выключателей генераторов и выключателей В2 или В1 разрешено включение В1 или В2 для подачи напряжения на шины генераторного распределительного устройства (ГРУ).

4. Режим электроснабжения потребителей MiniGrid от внешней электрической сети используется при аварийном или оперативном погашении ТЭЦ MiniGrid. Режим осуществляется путем отключения всех генераторных выключателей и включения выключателей в сечении связи В9 для рисунка 2.а и В10 для рисунка 2.б.

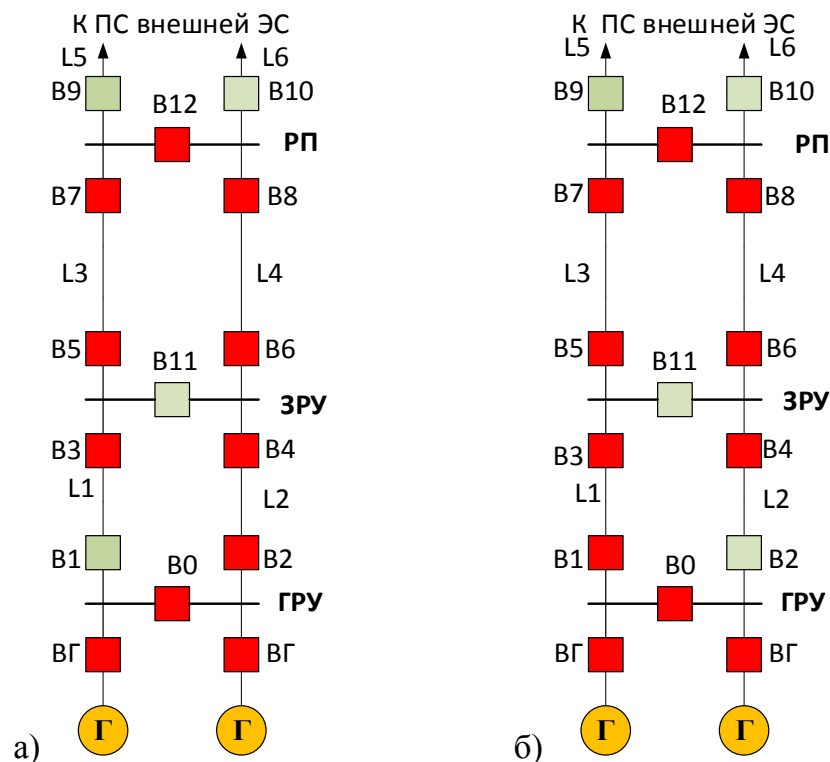


Рисунок 2 – Принимаемые нормальные коммутационные состояния схемы выдачи мощности в режиме автономной работы

5. Режим параллельной работы. Включение на параллельную работу MiniGrid с внешней электрической сетью осуществляется исключительно автооператором ПТК при выставлении автоматике флага «Параллельная работа разрешена». Синхронизация при включении на параллельную работу осуществляется на выключателях В9 или В10, при этом оператор устанавливается предпочтительность использования указанных

выключателей. При отсутствии напряжения со стороны ПС 110 кВ внешней энергосистемы на одном из выключателей автоматически используется выключатель с поданным напряжением.

6. Для управления режимом параллельной работы MiniGrid с внешней электрической сетью в MiniGrid предполагается использование системной автоматики, представляющей собой взаимодействующий комплекс противоаварийной, режимной автоматик и автооператора переходов из режимов параллельной работы в автономный и наоборот, а также выбора состава работающих энергоблоков на ТЭЦ и управления их мощностью для осуществления требуемого режима параллельной работы.

Автоматика не является основным средством защиты оборудования подстанции присоединения и питающих линий 110 кВ, однако, не мешает работе имеющейся защиты указанного оборудования и обеспечивает быстрое их отключение от собственного источника MiniGrid после их отключения от внешних источников.

Для обеспечения надежной работы автоматики и осуществления безопасной параллельной работы использована децентрализация автоматического управления. Системная автоматика представляет собой связанные дублированными каналами передачи данных 2 комплекса (ПТК 1, размещенный в диспетчерском центре ТЭЦ, и ПТК 2, размещенный в сечении схемы выдачи мощности во внешнюю сеть).

ПТК 1 осуществляет функции телемеханики MiniGrid, управления пусками и остановами ГПУ, режимами их работы для поддержания постоянной готовности к спорадическому отделению MiniGrid, выполнения ПТК 2 синхронизации MiniGrid с внешней электрической сетью.

ПТК 2 осуществляет функции опережающего отделения MiniGrid от внешней электрической сети при коротких замыканиях в сети MiniGrid и близких КЗ во внешней сети, резервирование отключения выключателей (УРОВ), пассивной синхронизации MiniGrid с внешней электрической сетью, сбор и передачу в ПТК телеметрической информации от расположенного в сечении оборудования.

7. Основными способами предотвращения несинхронных включений генераторов на параллельную работу с внешней электрической сетью являются:

- Синхронизация MiniGrid, с внешней электрической сетью осуществляется только в автоматическом режиме управления MiniGrid в заранее установленных сечениях;
- Включение ГУ на шины генераторного распределительного устройства, находящиеся под напряжением, только с автоматической синхронизацией штатной блочной автоматикой ГУ;
- Блокировка автоматического повторного включения питающих подстанцию присоединения MiniGrid ВЛ 110 кВ при наличии напряжения на отключенных линиях (При подпитке со стороны ТЭЦ MiniGrid).

8. Параллельная работа MiniGrid с внешней электрической сетью осуществляется исключительно при автоматическом управлении режимом MiniGrid от ПТК 1 и 2.

Оператор вправе назначить один из трех режимов обмена мощностью с внешней электрической сетью:

1. Режим поддержания нулевого обмена мощностью. В этом режиме групповой регулятор мощности ТЭЦ поддерживает с погрешностью регулирования динамический баланс мощности между генерацией и потреблением в MiniGrid. Такой режим иначе называется режимом следования за собственной нагрузкой. Для спорадического отделения MiniGrid он является режимом идеальной сбалансированности, однако, для экономики и технологии ТЭЦ он наименее благоприятен, т.к. свободные генерирующие мощности не используются, а интенсивность регулирования мощности энергоблоков выше, чем при автономной работе, т.к. при автономной работе возникающие динамические небалансы частично компенсируются изменениями частоты. При параллельной работе небалансы полностью проявляются в изменениях перетока и вызывают необходимость их компенсации в полном объеме;

2. Режим поддержания нулевой средней мощности с удержанием мощности в коридоре допустимых перетоков по сечению для устойчивости работы энергоблоков в случае спорадического отключения MiniGrid от внешней электрической сети (Режим работы в допустимом коридоре с нулевой средней мощностью). В этом режиме возникающий при спорадическом отключении небаланс MiniGrid не превышает допустимых сбросов/набросов мощности на работающий энергоблок (на энергоблоки 2000 кВт - около 150 -200 кВт). Ширина коридора зависит от числа работающих энергоблоков. При 3-4 работающих энергоблоках ширина коридора около \pm 500 кВт. Для ТЭЦ этот режим выгоден тем, что основную часть времени энергоблоки работают с постоянной нагрузкой, т.к. их загрузка корректируется только при выходе перетока за границы указанного коридора, что увеличивает их эксплуатационный ресурс и повышает КПД выработки энергии, использование установленной мощности энергоблоков, т.к. технологическим ограничением при регулировании перетока является мощность 70-80% от номинальной, а технологическим ограничением при работе с постоянной нагрузкой – 95-100%. Режим является основным при отсутствии свободных генерирующих мощностей;

3. Режим максимальной выдачи свободной генерирующей мощности во внешнюю электрическую сеть с учетом коридора допустимых небалансов при спорадическом отделении. В этом режиме автооператор ПТК1 выявляет наличие и количество свободных (неиспользуемых для покрытия собственной нагрузки MiniGrid) генераторов, определяет их как нерегулируемые и загружает до заданной максимальной величины. Также автооператор обеспечивает подключение цепей управления выключателями этих генераторов к выходу автоматики опережающего сбалансированного деления (АОСД), что будет приводить к их отключению при срабатывании пускового органа АОСД, т.е. при спорадическом отделении MiniGrid от внешней электрической сети.

При этом групповое регулирование остальных энергоблоков переводится в режим регулирования обменного перетока с поддержанием его равенства суммарной выдаваемой мощности свободными генераторами с учетом коридора допустимых небалансов в случае спорадического отделения MiniGrid. Этот режим экономически наиболее выгоден ТЭЦ, т.к. создает максимальное использование установленных мощностей электрогенерации и максимальную выработку энергии в режиме когенерации.

В третьей главе представлены модели (алгоритмы) режимного, противоаварийного управления и автооперирования опытного образца автоматики для физической модели MiniGrid созданной в НГТУ. Схема физической модели MiniGrid и внешний вид лаборатории представлены на рисунке 3.

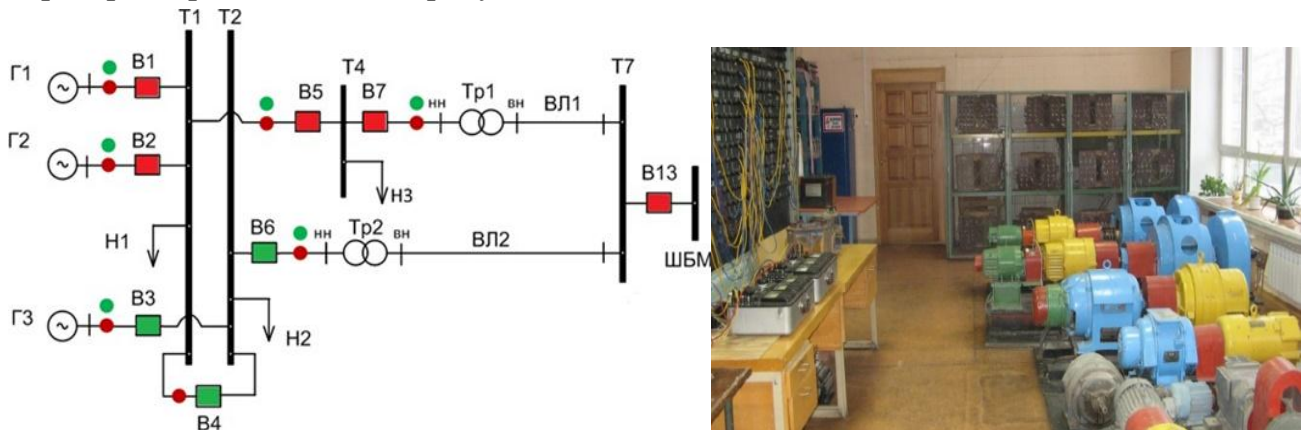


Рисунок 3 – Схема физической модели MiniGrid и внешний вид лаборатории

Представление алгоритмов выполнено методом ведущей линии. К каждому алгоритму прилагается таблица переменных.

Состав разработанных алгоритмов приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Структура и состав алгоритмов контроля и управления режимами MiniGrid

Базовые
Инициализация параметров при пуске системы
Информационно-измерительные
Идентификация классов состояния объекта
Выявление установившегося режима и измерение для сечений
Контроль готовности сечений к делению (выхода на заданную мощность по сечению)
Противоаварийные
Опережающее деление сети (с переходом полустанции в сбалансированный островной режим)
Блокировка недопустимых коммутаций в электрической сети
Режимно-локальные
Регулирование мощности ведущего генератора (по заданным частоте (индивидуально и в качестве ведущего в группе) или заданной активной мощности генератора или одного из 3-х сечений)
Регулирование мощности ведомого генератора (индивидуально регулирующий частоту, ведомый в группе при автономном режиме, задающий переток при параллельной работе)
Регулирование возбуждения ведущего генератора (индивидуальное, ведущего в группе)
Регулирование возбуждения ведомого генератора (индивидуальное без группы, с долевым участием в группе)
Режимно-системные
Включение генераторов с синхронизацией
Автооператорные
Выбор сечения полустанции для его балансирования
Изменение состава и режима включенных генераторов полустанции
Перевод параллельно работающей с внешней сетью станции в режим автономной работы
Перевод автономно работающей станции в режим параллельной работы с внешней сетью

Пример одного из алгоритмов, реализующего запатентованный способ выбора состава работающих энергоблоков и их загрузки, приведен на рисунке 4.

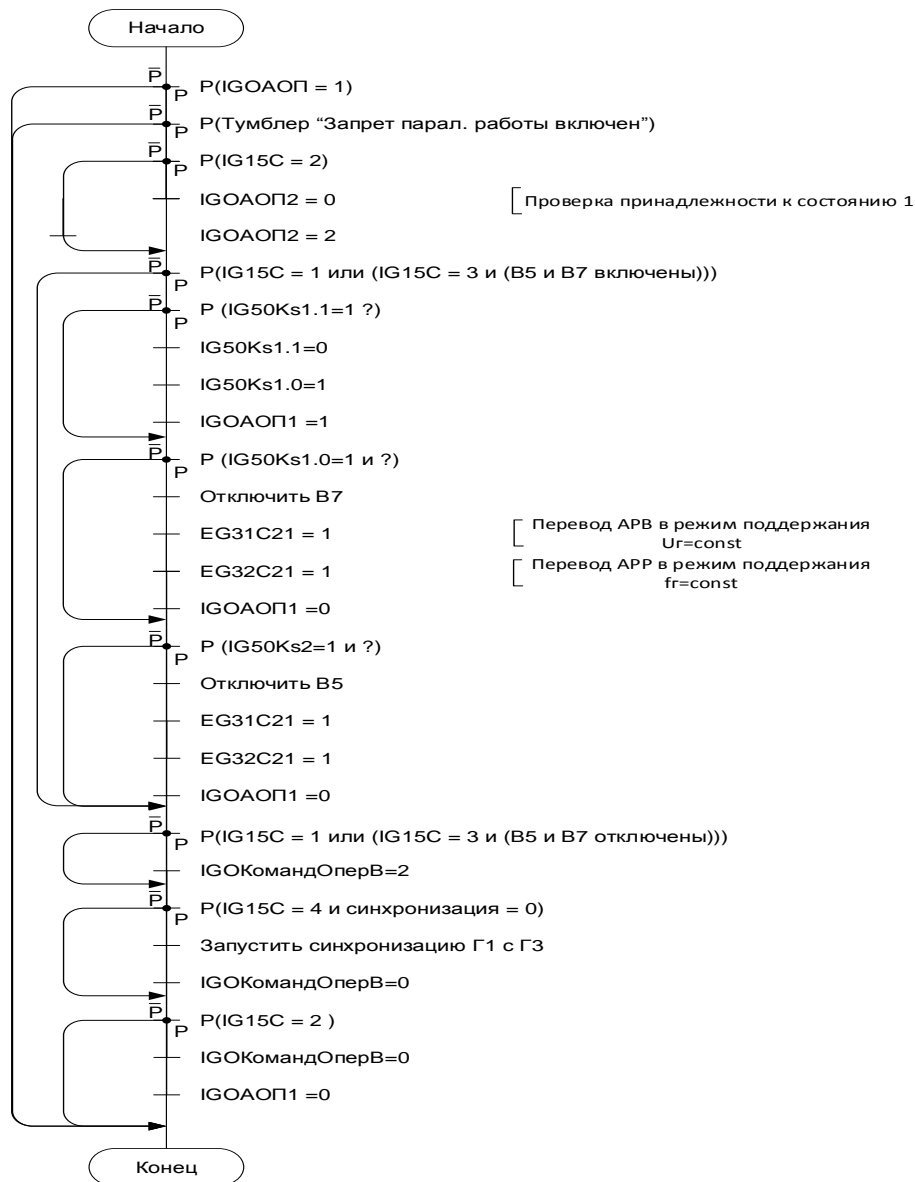


Рисунок 4 – Алгоритм изменения состава и режима включенных генераторов Minigrid

При разработке ПО и автоматики использовалась методология SADT, которая позволила предусмотреть все критически важные моменты функционала системной автоматики.

Четвертая глава посвящена технической реализации и испытаниям системной автоматики пилотного проекта Minigrid жилмассива «Березовое», расположенной в Первомайском районе г. Новосибирска. Minigrid имеет мини ТЭЦ с установленной электрической мощностью 10 МВт (ГПУ 5x2,0 МВт), суммарная нагрузка потребителей – 7,5 МВт, в том числе 4,5 МВт I категории, технологическое подключение к внешней сети осуществляется на напряжении 10 кВ. Внешний вид мини ТЭЦ, а также системной автоматики, установленной на ней изображены на рисунке 5. Схема выдачи мощности электростанции Minigrid в собственную и внешнюю сеть изображена на рисунке 6.

В главе представлен функционал системной автоматики с учетом взаимодействия с имеющейся на станции блочной автоматикой Terberg:

- Оперирование;
 - Ввод в работу/вывод энергоблоков (ГПУ);
 - Синхронизация генераторов с ГРУ;
 - Синхронизация MiniGrid по сечению;
 - Восстановление нормального режима;
 - Перевод MiniGrid в изолированный режим;
 - Перевод MiniGrid в режим параллельной работы с сетью;
 - Перевод группы энергоблоков в режим регулирования частоты;
 - Перевод группы энергоблоков в режим регулирования мощности;
- Противоаварийное управление;
 - Опережающее сбалансированное отделение MiniGrid от внешней сети при возмущении нормального режима;
- Режимное управление;
 - Выбор состава работающего генерирующего оборудования;
 - Регулирование перетока активной мощности с внешней электрической сетью;
 - Регулирование перетока реактивной мощности с внешней электрической сетью;
- Контроль и измерения;
 - Контроль текущего коммутационного состояния схемы сети;
 - Измерение режимных параметров MiniGrid.
- Блокировки и превентивные действия;
 - недопустимых включений MiniGrid на параллельную работу;
 - превентивный перевод MiniGrid в изолированный режим при технологических нарушениях, запретах на параллельную работу;
- Сигнализация и визуализация;
 - Визуализация текущего коммутационного состояния схемы;
 - Визуализация режимных параметров и ограничений;
 - Сигнализация о нарушениях в объекте и системе управления.



Рисунок 5 – Внешний вид мини-ТЭЦ жилмассива «Березовое» и установленная на ней системная автоматика

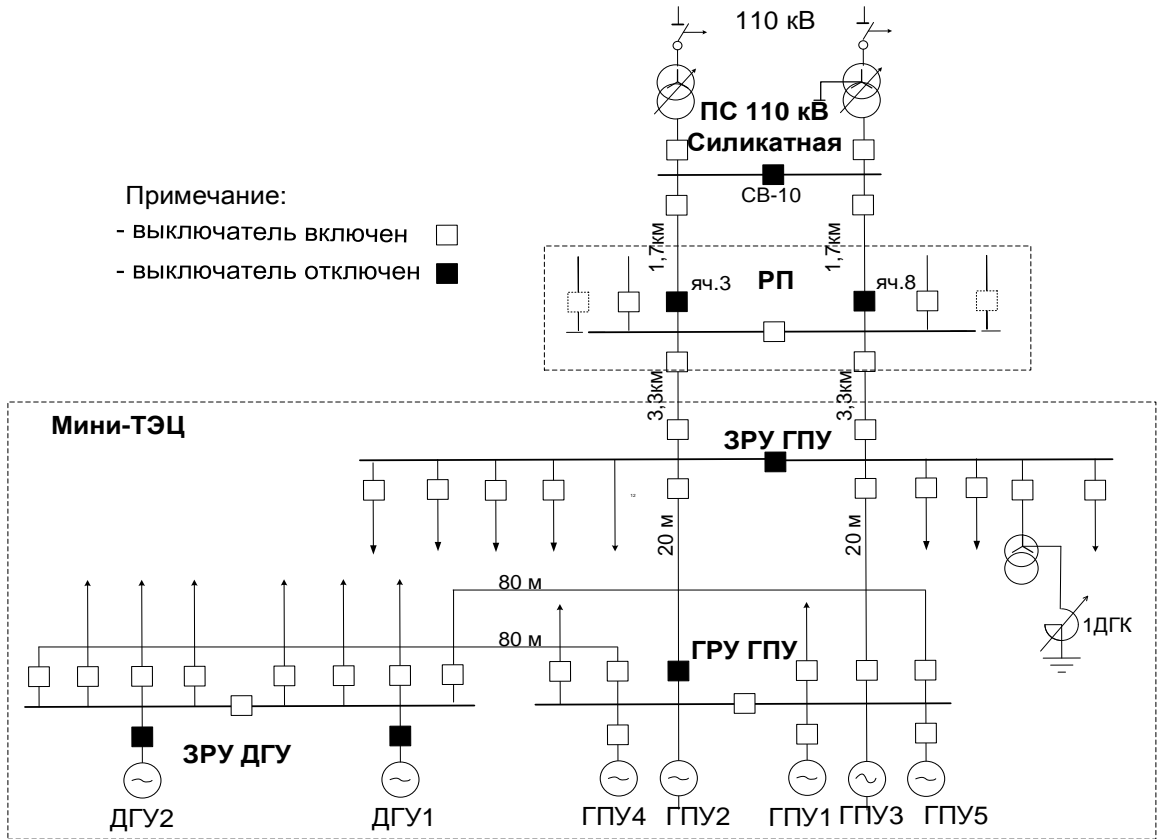


Рисунок 6 – Схема выдачи мощности мини ТЭЦ

Оперативная схема MiniGrid, контролируемая диспетчером и автоматикой MiniGrid, представлена на рисунке 7. Схема и режим соответствуют оперативному состоянию на 26 октября 2020 г. В работе находятся 3 энергоблока, режим MiniGrid параллельный с внешней энергосистемой по одной из линий связи с ПС Силикатная 110/10 кВ, вторая линия находится в резерве.

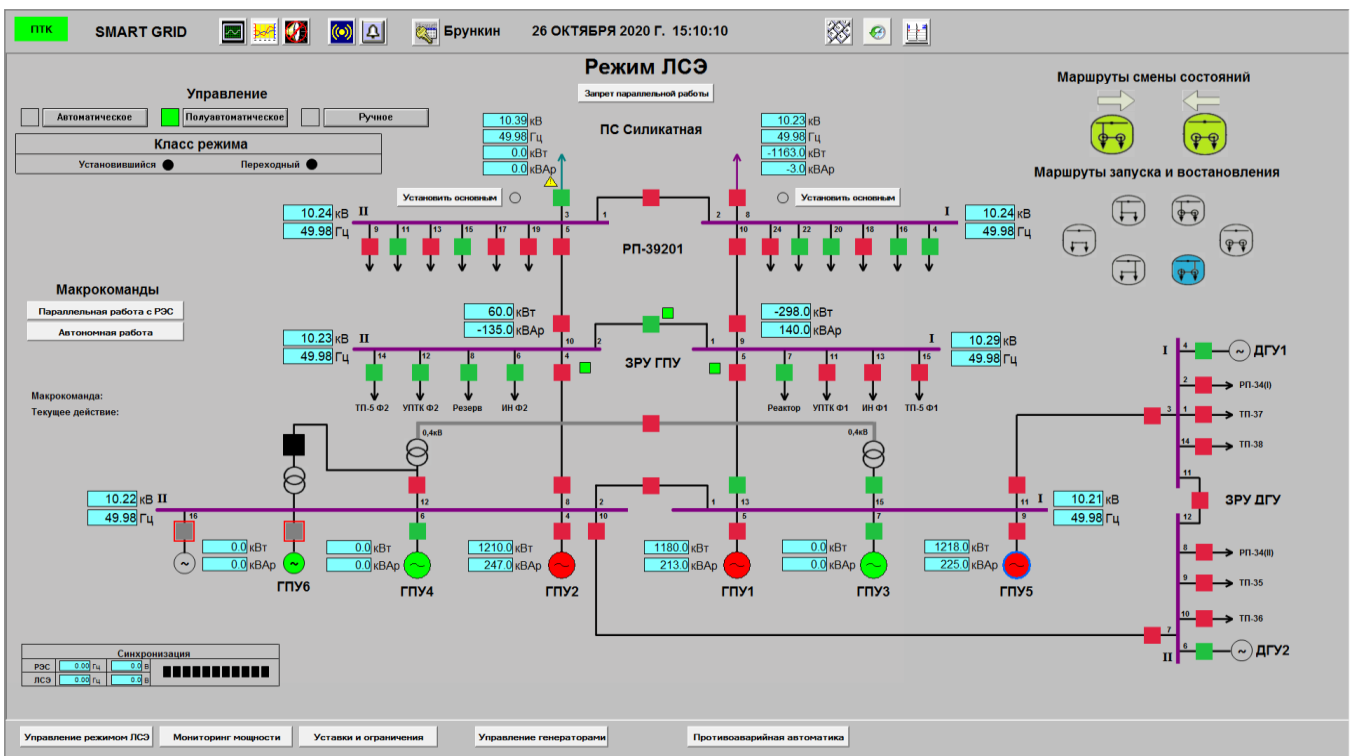


Рисунок 7 – Оперативная схема MiniGrid (Видеокадр ПТК)

Для ввода в эксплуатацию автоматики была разработана комплексная программа испытаний готовности MiniGrid к включению на параллельную работу с ЕЭС. Ниже приводится только перечень проверок, включенных в состав комплексной программы.

1. Проверка блокировки несинхронного включения выключателей фидеров связи 10 кВ с РП 39201 на ПС 110 кВ «Силикатная».

2. Проверка автоматической синхронизации MiniGrid «Березовое» с электрической сетью ЕЭС.

3. Проверка параллельной работы MiniGrid «Березовое» с электрической сетью ЕЭС в режимах поддержания сбалансированности с “нулевым” перетоком по сечению и с выдачей мощности в заданном коридоре ограничений по максимальной и минимальной мощности.

4. Проверка автоматического отделения MiniGrid «Березовое» от электрической сети ЕЭС при запрете параллельной работы со стороны диспетчерского персонала АО «РЭС» и АО «Филиал СО ЕЭС – Новосибирское РДУ».

5. Проверка автоматического восстановления режима параллельной работы из изолированного режима после отмены запрета на параллельную работу.

6. Проверка автоматического отключения подпитки MiniGrid «Березовое» отделившихся пассивных районов электрической сети АО «РЭС» (при поочередном отключении каждой из линий в режимах их использования для параллельной работы).

7. Проверка противоаварийного отключения MiniGrid «Березовое» от электрической сети ЕЭС выключателями 10 кВ на РП 39201 при имитации коротких замыканий в электрической сети с посадкой напряжения на РП 39201 ниже уставки срабатывания АОСД (0.8 от номинального).

Согласно Приказу Министерства энергетики РФ от 9 января 2019 г. любое генерирующее оборудование, работающее параллельно с ЕЭС должно участвовать в ОПРЧ.

Для удовлетворения требованиям к участию энергоблоков MiniGrid в ОПРЧ была разработана и реализована система автоматического регулирования частоты и мощности (АРЧМ) под управлением автооператора.

Работа АРЧМ в режиме параллельной работы MiniGrid с внешней электрической сетью устроена следующим образом. Основным режимом параллельной работы MiniGrid с внешней электрической сетью является работа энергоблоков в, так называемом, «коридоре допустимых небалансов», при котором мощность энергоблоков задается внешними постоянными сигналами по аналоговым каналам 4-20 мА, и регулируется только регуляторами частоты вращения двигателей. Т.е. системная автоматика осуществляет разомкнутое управление мощностью энергоблоков для задания желаемой выдаваемой мощности, а автоматические регуляторы частоты вращения (АРЧВ) осуществляют независимое регулирование мощности по отклонению частоты (ОПРЧ). При этом, состав работающих энергоблоков и желаемая нагрузка задаются автооператором, а ширина коридора допустимых небалансов определяется допустимостью набросов / сбросов

мощности на энергоблоки при спорадическом отделении MiniGrid от внешней электрической сети (сбросе обменного перетока мощности).

Во время работы в «коридоре допустимых небалансов» при приближении к границе коридора осуществляется корректировка желаемой загрузки энергоблоков для ввода режима в середину коридора. Необходимость корректировок обусловлена изменением собственной нагрузки MiniGrid и производится, как правило, с частотой 1-2 раза час. Длительность корректировки составляет 60-75 с. Корректировка осуществляется только при условии нахождения частоты в зоне мертвой полосы ОПРЧ, т.е. не препятствует его работе.

В работе была разработана и проведена программа проверки соответствия участия энергоблоков MiniGrid жилмассива «Березовое» в ОПРЧ существующим требованиям, а также методика получения статической характеристики первичного регулирования с учетом зоны нечувствительности, по результатам которых было подтверждено соответствие энергоблоков требованиям. На рисунке 8 представлены динамические характеристика одного из энергоблоков Мини ТЭЦ при набросе/сбросе мощности в допустимых пределах, и работе штатного регулятора скорости. Процесс в целом носит аperiodический характер.

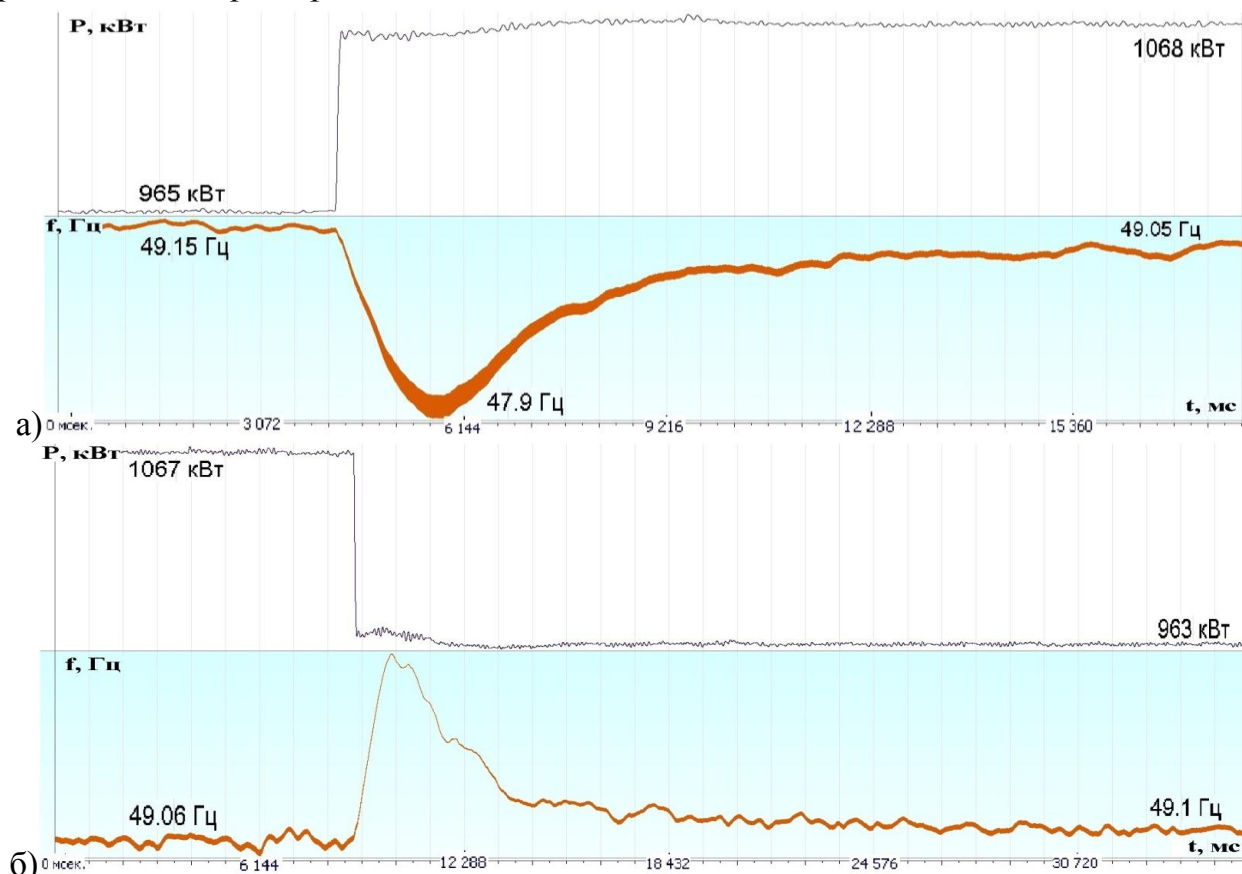


Рисунок 8 – Процессы изменения мощности и частоты энергоблока мощностью 2000 кВт при подключении (а) и отключении(б) нагрузки мощностью около 100 кВт

На рисунке 9 приведена экспериментально полученная статическая характеристика по частоте энергоблока мини ТЭЦ, подтверждающая соответствие требованиям зоны нечувствительности, заданного статизма (4%), и вводимой регулятором первично мощности.

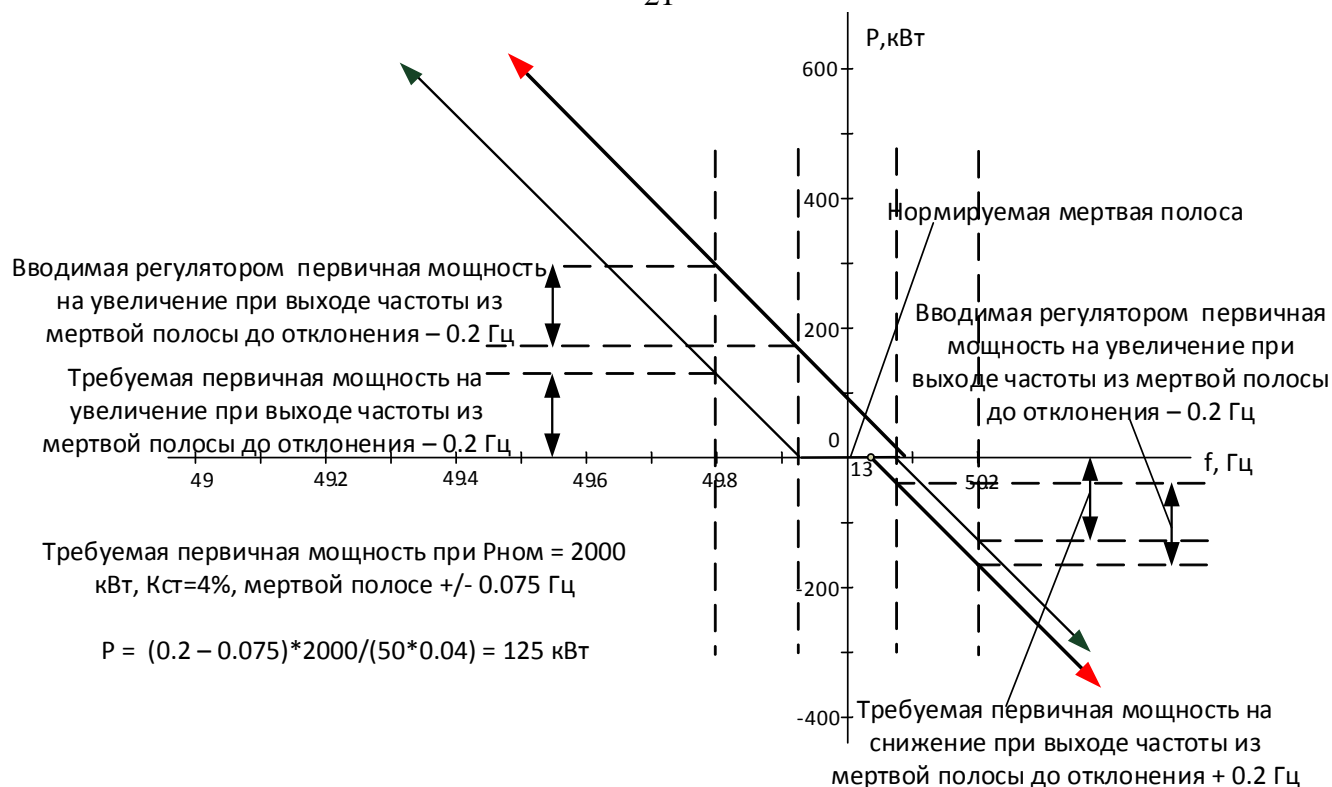


Рисунок 9 – Статическая характеристика регулирования частоты энергоблоком, подтверждающая соответствие требованиям к зоне нечувствительности, статизму и вводимой первичной мощности

В приложениях к диссертации представлены патент на изобретение и акты, подтверждающие внедрение результатов диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Наиболее простым и мало затратным способом интеграции ЛСЭ с внешней сетью является их прямое включение в сеть посредством синхронных связей. Однако, без специального управления такая параллельная работа МГ с внешней электрической сетью имеет риски для оборудования вследствие малой механической инерции роторов ГУ ЛСЭ. Появляется высокая вероятность возникновения асинхронных режимов и недопустимых ударных моментов на валах энергоблоков ЛСЭ. Также без специализированного управления при таком подключении увеличиваются отключаемые в сети ЛСЭ токи короткого замыкания, что может приводить к необходимости реконструкции коммутационного оборудования, средств РЗА, как в самой ЛСЭ, так и во внешней сети, также повышаются требования к квалификации оперативного персонала, что нивелирует низкие затраты на прямое подключение.

В работе предлагается комплекс из технических решений и системной автоматики, который позволяет из ЛСЭ при прямом подключении к внешней электрической сети создать MiniGrid, исключая риски, присущих ЛСЭ, работающих параллельно с централизованным электроснабжением посредством синхронных связей, а также преодолеть основные организационные и нормативные барьеры для включения ЛСЭ на параллельную работу.

Разработана интеллектуальная системная автоматика, осуществляющая режимное, противоаварийное управление и автооперирование MiniGrid, параллельно работающей с внешней энергосистемой.

При параллельной работе автоматика формирует и поддерживает загрузку двух групп генераторов с учетом допустимых аварийных небалансов на единицу генерирующего оборудования, меняет алгоритмы работы регуляторов в зависимости от класса режимов ЛСЭ.

Необходимость в автооператоре определяется сложностью и ответственностью данного функционала, что предъявляет высокие требования к квалификации диспетчерского персонала и его психофизической устойчивости, и, тем не менее, может приводить к негативному влиянию человеческого фактора на безопасность параллельной работы ЛСЭ с внешней сетью.

Разработанный комплекс алгоритмов управления режимами MiniGrid, ПО системной автоматики MiniGrid на его основе для ряда объектов, создают возможность использования разработанных алгоритмов (с некоторыми доработками) инжиниринговыми компаниями для создания системной автоматики для MiniGrid на различных технических платформах с учетом специфических особенностей схем и оборудования.

Для полной реализации функционала системной автоматики MiniGrid требуется ее взаимодействие с блочной автоматикой ГУ ЛСЭ, что, как правило, затруднено ограниченностью доступа к информации о блочной автоматике со стороны ее зарубежных производителей. Принятые технические решения и применение разработанной системной автоматики на реальном объекте доказывают возможность организации необходимого взаимодействия в условиях ограниченных возможностей, предоставляемых производителем оборудования.

Практическим результатом работы являются два прототипа системной автоматики MiniGrid, разработанные для физических моделей в НГТУ и НИУ МЭИ, которые доказали возможность технической реализации самой концепции MiniGrid, как интеллектуальной энергосистемы малой мощности, с последующей ее реализацией в пилотном проекте по объединению локальной системы энергоснабжения жилмассива с когенерационной электростанцией установленной электрической мощностью генераторов 10 МВт и тепловой 59 МВт с ЕЭС России по сетям 10 -110 кВ в г. Новосибирск.

Для доказательства работоспособности системной автоматики и безопасности режима параллельной работы ЛСЭ с внешней сетью, соответствия требованиям СО ЕЭС к генерирующему оборудованию по участию в общем режиме в связке предложенными техническими решениями были разработаны программы и методики испытаний: «Комплексная программа испытаний готовности MiniGrid к включению на параллельную работу с сетью ЕЭС» и «Программа проверки соответствия требованиям к участию энергоблоков ТЭС MiniGrid в ОПРЧ ЕЭС». По результатам испытаний в августе 2021 года MiniGrid жилмассива «Березовое» г. Новосибирск стал первой локальной интеллектуальной энергетической системой России на базе синхронной генерации.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ***Публикации в рецензируемых научных изданиях (Перечень ВАК РФ):***

1. Режимы и автоматика минигрид, работающих в составе распределительных электрических сетей ЭЭС / Фишов А.Г. Ивкин Е.С. Гилев О.В. Кокоша Ю.В // Релейная защита и автоматизация. – 2021. – №3. – С. 22-37;

2. Синхронизация Microgrid с внешней электрической сетью и между собой в нормальных и послеаварийных режимах при разных схемах объединения / Фишов А.Г., Гуломзоде А.Х., Ивкин Е.С., Семендяев Р.Ю // Релейная защита и автоматизация. – 2021. – №2. – С. 32-42;

3. Исследование влияния электронной генерации на статическую апериодическую устойчивость электроэнергетической системы / Фишов А.Г., Мурашкина И.С., Марченко А.И., Энхсайхан Э., Ивкин Е.С. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 2. С. 51-64;

Патент на изобретение Российской Федерации:

4. Фишов А.Г., Семендяев Р.Ю., Ивкин Е.С. Способ управления составом и загрузкой генераторов электростанции с собственными нагрузками, работающей изолированно и параллельно с приемной энергосистемой. Патент РФ № 2697510, 15.08.2019, Опубликовано: Бюллетень изобретений №23 от 15.08.2019;

Публикации в научных изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и/или Web of Science:

5. The analysis of power system steady-state aperiodic stability with electronic generation / A. Fishov, I. Murashkina, A. Marchenko, E. Enkhsaikhan, E. Ivkin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2021. - Vol. 1019 :14 International Forum on Strategic Technology (IFOST 2019), Tomsk, 2019. - Art. 012003 (11 p.). - DOI: 10.1088/1757-899X/1019/1/012013;

6. Automation of unmanned low capacity power plant with synchronized generation / A. G. Fishov, A. I. Marchenko, I. S. Murashkina, E. Erdenebat, O. V. Serdyukov, Y. S. Ivkin// Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2018) = Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2018) : тр. 14 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 2–6 окт. 2018 г. : в 8 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – Т. 1, ч. 5. – С. 108–114;

Публикации в других научных изданиях:

7. Системная автоматика для интеграции локальных систем электроснабжения с синхронной малой генерацией в электрические сети / Гежа Е.Н., Ивкин Е.С., Сердюков О.В., Глазырин В.Е., Глазырин Г.В., Марченко А.И., Семендяев Р.Ю., Фишов А.Г. // Релейщик. 2018. № 2 (32). С.24-31;

8. Влияние присоединения малой генерации на чувствительность дистанционной защиты в сети присоединения. / Ивкин Е.С., Фишов А.Г. // В сборнике: Наука. Технологии. Инновации. Сборник научных трудов в 9 частях. Новосибирский государственный технический университет. 2016. С. 116-118.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Тел. 8(383) 346-08-57

Формат 60x84 1/16. Объем 1,5 п.л. Тираж 100 экз.

Заказ № 387. Подписано в печать 22.10.2021 г.