

На правах рукописи



Гуломзода Анвари Хикмат

**НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ И
ВОССТАНОВЛЕНИЕМ НОРМАЛЬНОГО РЕЖИМА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
СЕТЕЙ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ МАЛОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические
системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2022

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

Научный руководитель: **Фишов Александр Георгиевич,**
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры Автоматизированных
электроэнергетических систем.

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;

Булатов Юрий Николаевич,
кандидат технических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Братский государственный
университет», кафедра энергетики,
заведующий кафедрой.

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

Защита диссертации состоится «22» сентября 2022 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. К. Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте организации <https://www.nstu.ru>

Автореферат разослан «___» июля 2022 г.

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

Осинцев Анатолий Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время широкое использование источников малой генерации играет роль катализатора в процессе преобразования пассивных распределительных сетей в активные, создавая новые задачи по управлению режимами их работы. Переход к децентрализованной системе электроснабжения потребителей привел к появлению концепции активных электрических сетей с распределенной малой генерацией, на базе которой создаются Mini- и MicroGrid, являющиеся интеллектуальными автоматизированными системами электроснабжения.

Актуальность темы диссертационного исследования обусловлена тем, что в электрических сетях, содержащих объекты с малой генерацией, в том числе Mini- и MicroGrid (далее просто обобщенно MicroGrid), невозможно исключить возникновения различных аварийных возмущений, как и в больших энергосистемах, зачастую приводящих к их разделению на части. Тем не менее, синхронизация объектов MicroGrid после распада затруднительна ввиду стохастического характера изменения нагрузки и малой инерционности энергоблоков. К тому же, островная работа таких объектов, как правило, не удовлетворяет требованиям надежности и качества электрической энергии, особенно по частоте.

Существующие способы и устройства синхронизации объектов с малой генерацией в активных распределительных электрических сетях недостаточно эффективны, как ввиду недоучета стохастичности параметров синхронизации и малой инерционности роторов, так и необходимости выполнения синхронизации на удаленных коммутационных аппаратах в условиях неразвитой системы передачи данных о режимных параметрах и множественности возможных сечений для аварийного и противоаварийного деления сети.

На основании изложенного, можно утверждать, что децентрализованная синхронизация в электрической сети на множестве удаленных коммутационных аппаратах (без использования средств связи между генерирующими, управляющими и синхронизирующими элементами) является актуальной задачей, которая недостаточно исследована.

Степень разработанности темы исследования. Исследованиями в области распределенной генерации и интеллектуальных энергосистем в последние годы занимаются многие ученые, среди которых в России: Азорин А.Ю., Армеев Д.В., Беляев Н.А., Бердин А.С., Булатов Ю.Н., Бык Ф.Л., Воропай Н.И., Глазырин Г.В., Илюшин П.В., Исмоилов С.Т., Ивкин Е.С., Куликов А.Л., Ландман А.К., Мукатов Б.Б., Марченко А.И., Мышкина Л.С., Мурашкина И.С., Петрищев А.В., Семендяев Р.Ю., Сазыкин В.Г., Фишов А.Г., Эйхсайхан Э. и др. Также, данное направление широко исследуется зарубежными учеными, такими как: Ashabani S.M., Barnes M., Chen Z., Cho C., Litwin M., Laaksonen H., Nejabatkhah F., Shah S., Zhou X., Zaidi A.A. и др.

Цель диссертационной работы – исследование и разработка способов и алгоритмов для прототипа автоматики децентрализованного управления синхронизацией, восстановления целостности сети с MicroGrid и ее нормального режима после распада на части без обмена данными между элементами, участвующими в процессе синхронизации.

Задачи исследования для достижения цели:

1. Анализ особенностей существующих способов синхронизации, восстановления целостности сети с MicroGrid и ее нормального режима после распада на части с нормальными и послеаварийными режимными параметрами;
2. Разработка и исследование нового способа удаленной синхронизации и восстановления нормального режима аварийно разделенной электрической сети с источниками генерации;
3. Разработка и тестирование модифицированного алгоритма пассивной синхронизации MicroGrid с сетью централизованного энергоснабжения;
4. Моделирование и исследование способа децентрализованной синхронизации множества MicroGrid в распределительной электрической сети;
5. Разработка алгоритмов специального управления мощностью и возбуждением генераторов для создания условий успешной децентрализованной синхронизации;
6. Разработка прототипа автоматики децентрализованной синхронизации активных частей электрической сети и ее испытание на физической модели электроэнергетических систем НГТУ.

Объект исследования: электрические сети с MicroGrid и распределенной малой генерацией.

Предмет исследования: средства и способы управления режимными параметрами генерирующих установок MicroGrid и активных частей электрической сети при их синхронизации, восстановлении целостности и нормального режима сети.

Научная новизна диссертации:

1. Предложен и исследован способ децентрализованной синхронизации и восстановления нормального режима аварийно разделенной электрической сети с генераторами;
2. Разработаны алгоритмы, осуществляющие специальное управление мощностью и возбуждением генераторов в процессе синхронизации;
3. Разработан прототип автоматики, которая без обмена данными осуществляет децентрализованное управление синхронизацией и восстановление целостности сети после ее распада на работоспособные части;
4. Разработан модифицированный алгоритм улавливания синхронизма для удаленной синхронизации частей сети с наличием источников малой генерации;
5. Экспериментально подтверждена работоспособность предложенных способов и алгоритмов децентрализованного управления синхронизацией на физической модели.

Теоретическая и прикладная значимость работы. Решена актуальная научно-техническая задача децентрализованной синхронизации активных частей сети, в том числе MicroGrid без обмена информацией между участвующими в ней устройствами. Запатентованный способ удаленной синхронизации реализован в прототипе автоматики децентрализованного управления синхронизацией.

Методология и методы исследования. Для достижения поставленных целей и решения задач в работе использованы методы математического моделирования в программно-вычислительном комплексе «Rustab – RastrWin3», а также физического моделирования при испытаниях прототипа автоматики на электродинамической модели энергосистемы в лаборатории центра коллективного пользования «Центр

испытаний устройств контроля и управления режимами электроэнергетических систем» Новосибирского государственного технического университета.

Положения, выносимые на защиту:

1. Предложенный способ децентрализованной удаленной синхронизации и восстановления целостности аварийно разделенной электрической сети с генераторами позволяет успешно синхронизировать MicroGrid с другими частями сети;

2. Специальное управление мощностью и возбуждением генераторов обеспечивает осуществимость удаленной синхронизации активных частей сети без использования средств передачи данных;

3. Модифицированные условия синхронизации позволяют минимизировать воздействие уравнивающих токов на генераторы MicroGrid при их включении на параллельную работу с мощной внешней электрической сетью.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы», а именно: 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 промышленной программы для имитационного моделирования, выполнением физического моделирования энергосистем и испытанием прототипа разработанной автоматики на физической модели.

Результаты исследования, полученные в ходе работы, автором диссертации докладывались и обсуждались на: научных семинарах кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета (НГТУ), II Всероссийской научно – практической конференции аспирантов и магистрантов (г. Новосибирск, 2018 г.), VIII международной научно – практической конференции аспирантов и магистрантов (г. Новосибирск, 2019 г.), международной научно – практической конференции: «Энергетика региона: Состояние и перспективы развития» (г. Душанбе, 2019 г.), Международной научный семинар имени Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики» (г. Волжский, 2021 г.), международной научно – практической конференции «Энергетика: Состояние и перспективы развития» (г. Душанбе, 2021 г.).

Гранты, полученные автором диссертации на проведение научно – исследовательских работ: Грант аспиранта факультета Энергетики НГТУ (2020 г.), Грант РФФИ на лучшие проекты фундаментальных научных исследований, выполняемые молодыми учеными, обучающимися в аспирантуре «Аспиранты» (2020 г.).

Стипендии, полученные автором диссертации за научные достижения: Стипендии Правительства Российской Федерации аспирантам организации, осуществляющих образовательную деятельность, обучающихся по образовательным программам высшего образования по очной форме по специальностям или

направлениям подготовки, соответствующим приоритетным направлениям модернизации и технологического развития российской экономики (2021, 2022 г.).

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 12 научных работах, в том числе, в 4-х статьях в изданиях согласно перечню российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (перечень ВАК РФ), в 2-х статьях в научных изданиях, индексируемых в первом и втором квартилях наукометрических баз данных Scopus и Web of Science и в 5-и публикациях в сборниках материалов и трудов научных конференций. Получен 1 патент на изобретение Российской Федерации. Внедрение результатов диссертационного исследования подтверждено 2-я актами.

Благодарность. Автор выражает глубокую благодарность доценту кафедры Электрических станций Осинцеву Анатолию Анатольевичу за помощь в реализации программного обеспечения и содействии в подготовке и проведении экспериментальных исследований.

Личный вклад автора диссертации. Личный вклад соискателя заключается в формализации постановок задач, разработке идеи способа удаленной синхронизации и восстановления нормального режима аварийно разделенной электрической сети с генераторами, моделировании процессов децентрализованной синхронизации распределительных электрических сетей с источником малой генерации, разработке алгоритмов специального управления мощностью и возбуждением генераторов, подготовке и проведении физических экспериментов, подготовке статей и докладов к опубликованию.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, словаря терминов, списка литературы, включающего 109 наименований, и семи приложений. Общий объем работы составляет 186 страниц, включая 23 таблиц и 103 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе проанализированы существующие способы синхронизации, возможные пути восстановления целостности активной сети с малой генерацией и ее нормального режима после распада на части.

Развитие распределенных по электрической сети объектов с малой генерацией является все более существенным фактором, определяющим облик и режимные свойства современных электроэнергетических систем. Это развитие, как правило, является следствием недостатков концепции сверх централизованного энергоснабжения в условиях либеральной экономики, стремления потребителей к рационализации способов удовлетворения своих потребностей в энергии, а также к участию в энергетическом бизнесе. К таким объектам отнесены: электростанции малой мощности, MiniGrid (локальные системы энергоснабжения (ЛЭС) на базе

синхронной генерации мощностью до 25 МВт и напряжением внутренней сети 10 кВ) и MicroGrid на базе синхронной генерации мощностью до 1 МВт и напряжением внутренней сети 0,4 кВ. В западной классификации подобного разделения нет и оба последних объекта классифицируются как MicroGrid. В дальнейшем также будет использовано общее наименование таких объектов, т.е. MicroGrid.

Полезным свойством для надежности электроснабжения собственных потребителей, системной надежности MicroGrid и внешних энергосистем в режимах параллельной работы является их способность к спорадическим переходам в островной режим с сохранением работоспособности без существенного нарушения балансов мощности, поддерживаемая противоаварийным и режимным управлением, что обеспечивает живучесть общей системы и быстрое восстановление нормальных режимов. Как запуск электростанции с нуля, так и восстановление режима параллельной работы нуждаются в надежной и безопасной для оборудования синхронизации активных частей общей сети, которая во многих случаях имеет существенные отличия по режимным условиям и способам осуществления от обычной.

В зависимости от вида управления используют два способа синхронизации MicroGrid между собой или с внешней сетью, такие как:

- Способ пассивной синхронизации – когда ожидается ситуация, в которой измеряемые параметры синхронизации с двух сторон коммутационного аппарата равны или близки друг-другу. Этот вид прост в реализации, однако как правило, процесс синхронизации затягивается;
- Способ активной синхронизации – использует дополнительное управление для ввода синхронизируемых параметров в допустимую область, и это обеспечивает более быстрое и мягкое подключение MicroGrid к внешней сети.

Также, актуальной является задача восстановления целостности после аварийного или противоаварийного разделения активной сети. К коммутационным аппаратам, используемым при синхронизации, предъявляются некоторые требования, в частности, быстродействие, автономность и др. Этим требованиям вполне отвечают, например, при напряжениях 6-10-35 кВ – реклоузеры. Для активных сетей реклоузеры должны снабжаться устройствами включения с улавливанием синхронизма.

Вторая глава посвящена децентрализованной синхронизации MicroGrid с мощной внешней электрической сетью и частей активной электрической сети с малой генерацией между собой как одной из основных задач обеспечения нормального функционирования объектов с малой генерацией в электрических сетях.

Необходимость в параллельной работе MicroGrid с внешней сетью и их синхронизации обуславливаются желанием повышения качества электрической энергии, особенно по частоте, использования избыточной мощности генераторов в MicroGrid, покрытия дефицита мощности в MicroGrid, в т.ч. при выводе в ремонт энергоблока(ов).

Малая инерционность роторов генераторов и высокая стохастичность нагрузок потребителей в MicroGrid являются основными негативными факторами, влияющими на процесс синхронизации. Именно они определяют интенсивность

колебания частоты и взаимных углов при синхронизации. На рисунке 1 в качестве примера приведена осциллограмма частоты для режима параллельной работы MicroGrid с внешней сетью и островной работы MicroGrid с максимальной мощностью нагрузки 5-6 МВт.

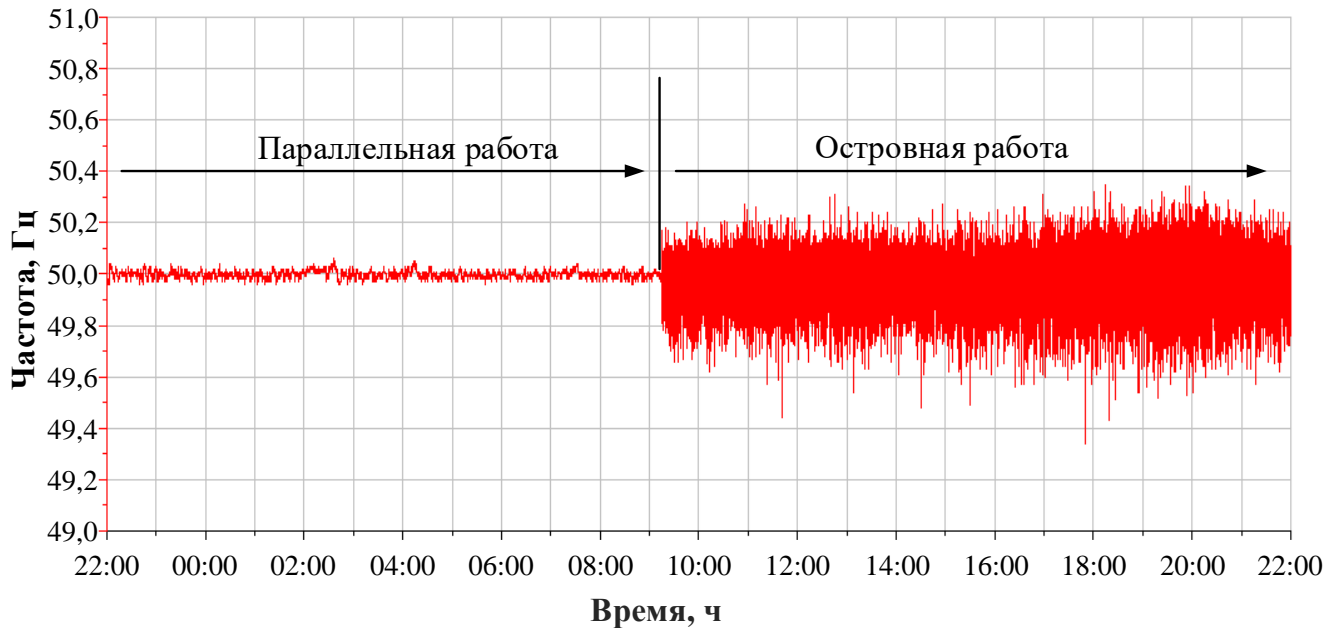


Рисунок 1 – Колебания частоты в MicroGrid в режиме параллельной работы с внешней сетью и после отключения

При обычной синхронизации в процессе формирования и после выдачи сигнала на включение выключателя может существенно измениться мощность нагрузки, что приведет к недопустимому рассогласованию условий синхронизации (угла сдвига фаз между векторами напряжения MicroGrid и внешней сети). В результате, из-за превышения допустимого угла сдвига фаз между вектором напряжения MicroGrid и напряжением внешней сети допустимых значений и, соответственно, возникновения недопустимого уравнивающего тока возможно отключение генераторов MicroGrid защитами, сокращение их срока службы и даже повреждение.

Для успешности синхронизации MicroGrid с внешней сетью в работе предлагаются дополнительные условия синхронизации, учитывающие знак взаимного скольжения векторов напряжений (Рисунок 2):

$$|\Delta\delta| \leq \frac{\Delta\delta_{\text{доп}}}{2} \wedge \text{Sign } \Delta\delta > 0 \quad (1)$$

при $S \geq 0$ и

$$|\Delta\delta| \leq \frac{\Delta\delta_{\text{доп}}}{2} \wedge \text{Sign } \Delta\delta < 0 \quad (2)$$

при $S \leq 0$,

где: $\Delta\delta$ – взаимный угол векторов напряжений ($\Delta\delta = \delta_c - \delta_{\text{MCG}}$), S – скольжение ($S = f_c - f_{\text{MCG}}$), f_{MCG} – частота вектора напряжения со стороны MicroGrid.

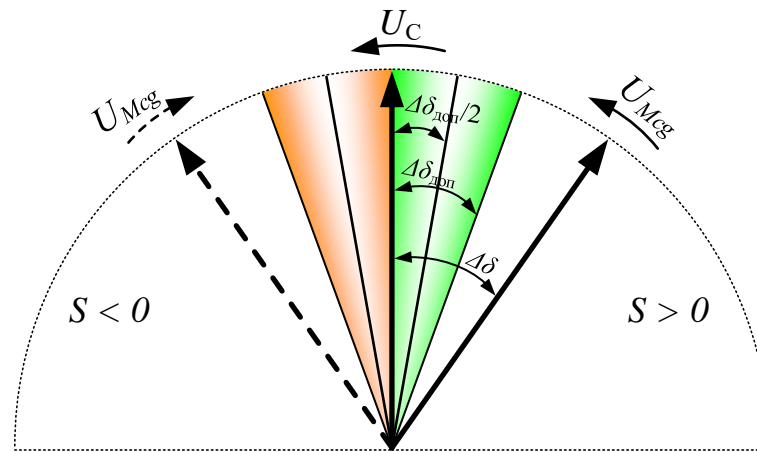


Рисунок 2 – Графическое пояснение дополнительных условий синхронизации

Дополнительные условия необходимы, чтобы иметь запас по углу на время включения выключателя с учетом возможного реверса скольжения векторов напряжений при изменении нагрузки MicroGrid.

MicroGrid могут работать и в составе сетей малой мощности, где частота в нормальных режимах на уровне номинальной удерживается значительно хуже, а в послеаварийных режимах с разделением активной сети на части и с учетом работы противоаварийной автоматики (автоматика ограничения снижения напряжения (АОСН), автоматика ограничения повышения напряжения (АОПН), автоматика ограничения снижения частоты (АОСЧ), автоматика ограничения повышения частоты (АОПЧ)) имеет значительные квазиустановившиеся отклонения. При этом разделение сети может происходить на удаленных коммутационных аппаратах. В результате автоматическая синхронизация частей сети становится невозможной.

Для решения данной задачи в работе предложен и исследован специальный способ децентрализованной синхронизации аварийно или противоаварийно разделившихся частей сети – способ удаленной синхронизации и восстановления нормального режима аварийно разделенной электрической сети с генераторами. Назначением способа является автоматическая синхронизация и восстановление нормального режима параллельной работы разделившихся частей электрической сети на удаленных коммутационных аппаратах без использования передачи данных и команд телеуправления ими.

Работу способа представим на примере схемы электрической сети с двумя MicroGrid, работающими параллельно с внешней электрической сетью, в которой после ее аварийного разделения осуществляется удаленная синхронизация разделившихся частей (Рисунок 3).

В состав внешней сети входят (часть, выделенная фиолетовым цветом) нагрузки Н1, Н2 питание которых осуществляется со стороны сборной шины 6-10 кВ через головной выключатель В1. MicroGrid-1 (часть, выделенная зеленым цветом) состоит из нагрузки Н3 и станции с двумя генераторами Г1, Г2 с выключателями В2, В3 и блока управления генерацией БУ1. В MicroGrid-2 (часть, выделенная оранжевым цветом) входят нагрузка Н4 и станция с двумя генераторами Г3, Г4 с выключателями В4, В5 и блоком управления генерацией БУ2.

Реклоузеры P1, P2, P3 с блоками улавливания синхронизма используются для разделения и воссоединения частей сети.

Исходно MicroGrid-1 и MicroGrid-2 работают параллельно с внешней электрической сетью (при отключенном P3). При возникновении аварийного возмущения, например, при КЗ на фидере нагрузки H2, срабатывает быстродействующая защита с отключением реклоузеров P1, P2 и разделением сети, последующим срабатыванием защиты и отключением выключателя В1.

При аварийном разделении сети в послеаварийном режиме одну (MicroGrid-1) из частей представим несбалансированной т.к. в ней будет исчерпана возможность регулирования частоты или напряжения, и соответствующие параметры будут иметь значительные, но допустимые для послеаварийного режима отклонения от номинальных.

Для восстановления целостности разделившихся частей сети (объединения на параллельную работу MicroGrid-1 и MicroGrid-2 через P3) запускается режим “сканирования” выполнения условий синхронизации на удаленных коммутационных аппаратах с согласованным управлением частотой и напряжением (гармонизацией), осуществляемым путем вторичного регулирования частоты и напряжения блоками БУ-1 и БУ-2.

Под *гармонизацией* понимается такая работа регуляторов возбуждения и мощности, при которой осуществляется приведение относительных отклонений напряжения и частоты от номинальных значений к одинаковому значению для обеспечения их последующего согласованного изменения или обеспечения равенства и постоянства в относительных значениях.

Под *сканированием* понимается осуществление вторичного согласованного низкочастотного изменения гармонизированных частоты и напряжения в пределах допустимых диапазонов их отклонений.

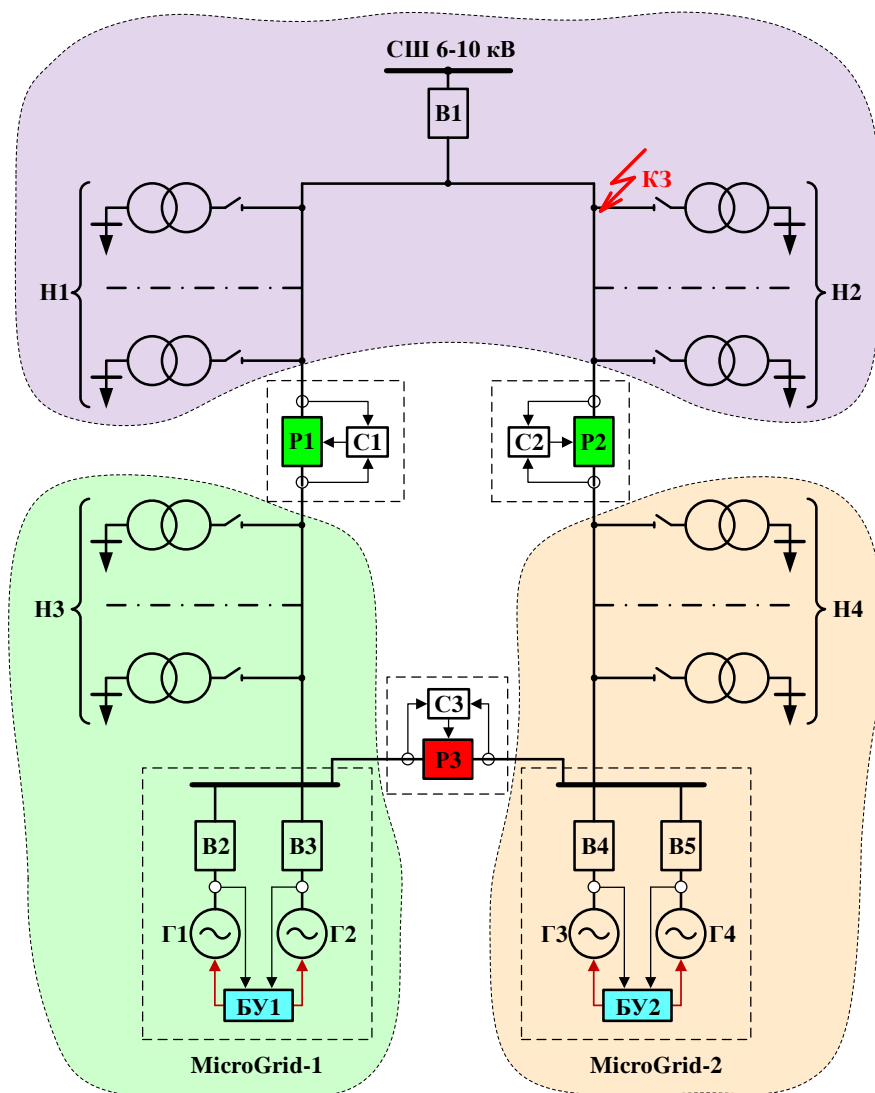


Рисунок 3 – Пример схемы электрической сети, содержащей две MicroGrid

Так как, MicroGrid-1 не сбалансирована и ее режимные параметры, в частности частота, ввиду невозможности ее регулирования зависла на повышенном уровне, то блоком управления БУ1 осуществляется соответствующее отклонению частоты от номинального значения повышение напряжения.

Гармонизированное сканирующее изменение напряжения и частоты в MicroGrid-2 и гармонизированные постоянная частота и напряжения в MicroGrid-1 приводят на реклоузере РЗ к выполнению условий для срабатывания его блока улавливания синхронизма СЗ с включением на параллельную работу MicroGrid-1 и MicroGrid-2.

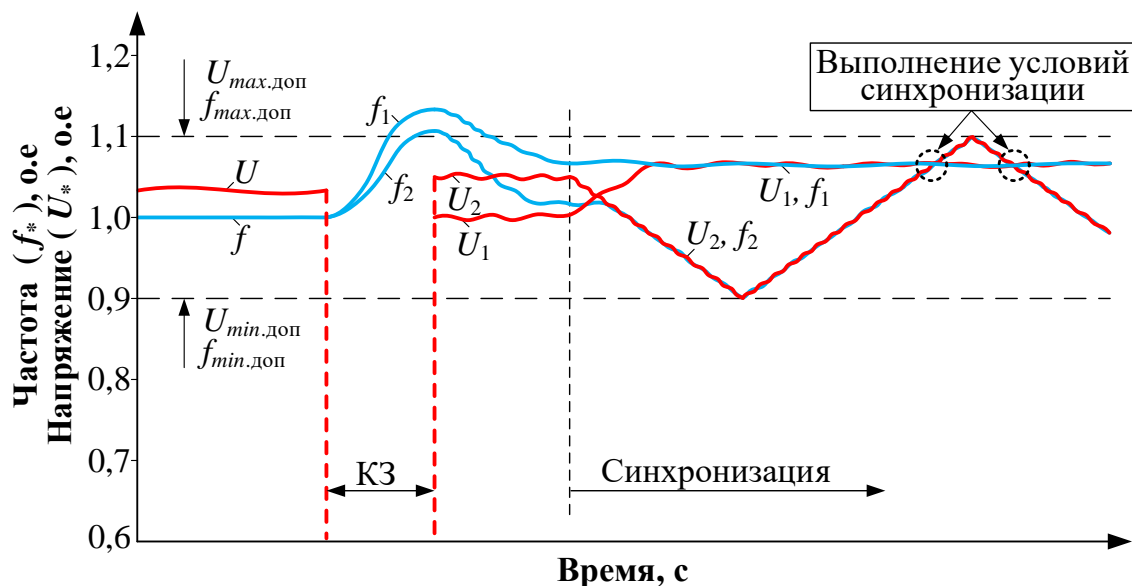


Рисунок 4 – График процесса вторичного согласованного низкочастотного регулирования частоты и напряжения на генераторах MicroGrid

По факту смены реакции MicroGrid-1 и MicroGrid-2 на вторичное регулирование скорости и напряжения при изменениях частоты и напряжения идентифицируется восстановление параллельной работы разделившихся частей сети, прекращается низкочастотное периодическое вторичное регулирование частоты и напряжения, регулирование мощности и возбуждения БУ2 переводится в режим поддержания заданных значений частоты и напряжения, а БУ1 в режим регулирования заданной мощности и коэффициента мощности.

Таким образом, в данном способе блоки управления коммутационных аппаратов, регуляторы генераторов частей электрической сети не взаимодействуют между собой, но совместно выполняют децентрализованную синхронизацию MicroGrid и восстановление режима их параллельной работы.

Реализация децентрализованной синхронизации

Для достижения успешности децентрализованной синхронизации предлагается специальная система управления мощностью энергоблоков и возбуждением генераторов.

Условия синхронизации активных частей сети успешно выполняются при осуществлении определенных действий, порядок которых следующий:

- определяется класс баланса мощностей в разделившихся частях сети;
- осуществляется гармонизация частоты и напряжения в разделившихся частях сети;

- осуществляется специальное управление мощностью и возбуждением генераторов в сбалансированно разделившихся частях сети для создания условий синхронизации на удаленных коммутационных аппаратах при и значительных отклонениях параметров от номинальных значений.

Для того, чтобы осуществить специальное управление мощностью и возбуждением генераторов, необходимо идентифицировать, в каком классе баланса мощностей оказались отдельные части сети после разделения. В таблице 1 представлены возможные классы баланса мощностей в разделившихся частях сети после отработки противоаварийных автоматов и регуляторов генераторов.

Таблица 1 – Множество классов баланса мощностей частей сети

Обозначение класса	Соотношение генерации и потребления мощности	Режимные параметры сети после распада	
		Частота – f	Напряжение – U
К1	Баланс активной и реактивной мощностей	$f \approx f_{\text{НОМ}}$	$U \approx U_{\text{НОМ}}$
К2	Баланс активной и избыток реактивной мощностей	$f \approx f_{\text{НОМ}}$	$U \gg U_{\text{НОМ}}$
К3	Баланс активной и дефицит реактивной мощностей	$f \approx f_{\text{НОМ}}$	$U \ll U_{\text{НОМ}}$
К4	Избыток активной и баланс реактивной мощностей	$f \gg f_{\text{НОМ}}$	$U \approx U_{\text{НОМ}}$
К5	Дефицит активной и баланс реактивной мощностей	$f \ll f_{\text{НОМ}}$	$U \approx U_{\text{НОМ}}$
К6	Избыток активной и реактивной мощностей	$f \gg f_{\text{НОМ}}$	$U \gg U_{\text{НОМ}}$
К7	Избыток активной и дефицит реактивной мощностей	$f \gg f_{\text{НОМ}}$	$U \ll U_{\text{НОМ}}$
К8	Дефицит активной и избыток реактивной мощностей	$f \ll f_{\text{НОМ}}$	$U \gg U_{\text{НОМ}}$
К9	Дефицит активной и реактивной мощностей	$f \ll f_{\text{НОМ}}$	$U \ll U_{\text{НОМ}}$
К10	Отсутствие генерации мощности	0	0

Для того, чтобы части сети классов К2-К9 смогли успешно синхронизироваться с частями класса К1, необходимо предварительно гармонизировать их режимные параметры (частоту и напряжение).

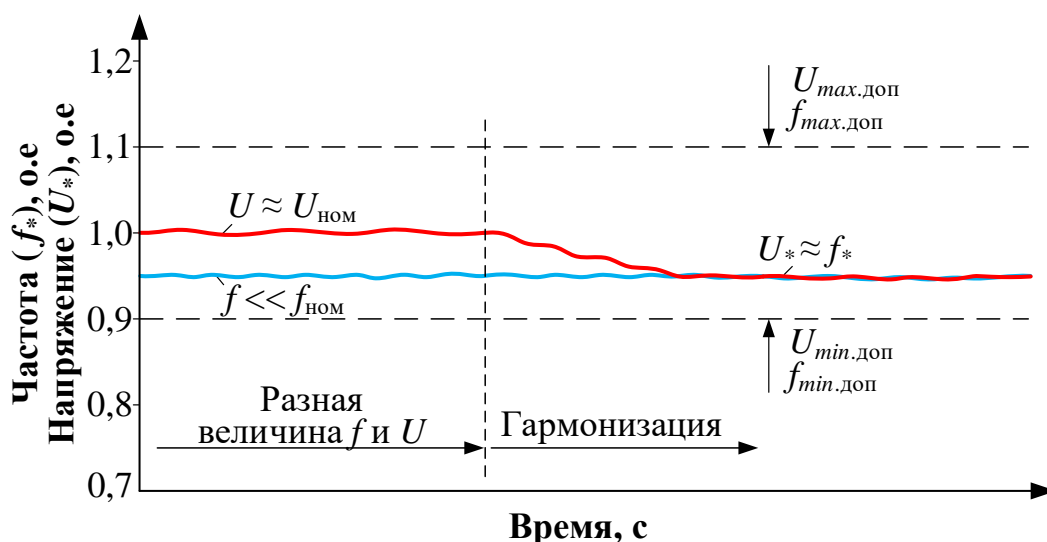


Рисунок 5 – Пример процесса гармонизации частоты и напряжения активной части сети класса К5

На рисунке 5 приведен пример гармонизации активной части сети с классом К5 (с дефицитом активной мощности). В такой ситуации гармонизацию осуществляют по второму параметру, в случае рисунка 5 – по напряжению.

Согласно алгоритму, устройство АРВ снижает напряжение до величины, в котором оно равнялась бы величине частоты в относительных значениях от номинального.

Для успешности децентрализованной синхронизации, восстановления целостности и нормальности режима активной сети после нормализации необходимо применить специальное управление – сканирование условий синхронизации на параметрах сети, значительно отличающихся от номинальных.

Ввиду отсутствия данных о режимных параметрах на удаленных выключателях, осуществляющих АПВ с улавливанием синхронизма, на электростанциях в частях сети класса К1 создание условий для синхронизации разделившихся частей предлагается осуществлять с помощью вторичного регулирования АРС и АРВ с низкочастотным согласованным изменением частоты и напряжения. На этих устройствах запускается изменение гармонизированных частоты и напряжения по заданному закону, например, линейному (Рисунок 6) либо синусоидальному во всем диапазоне допустимых изменений параметров для послеаварийного режима.

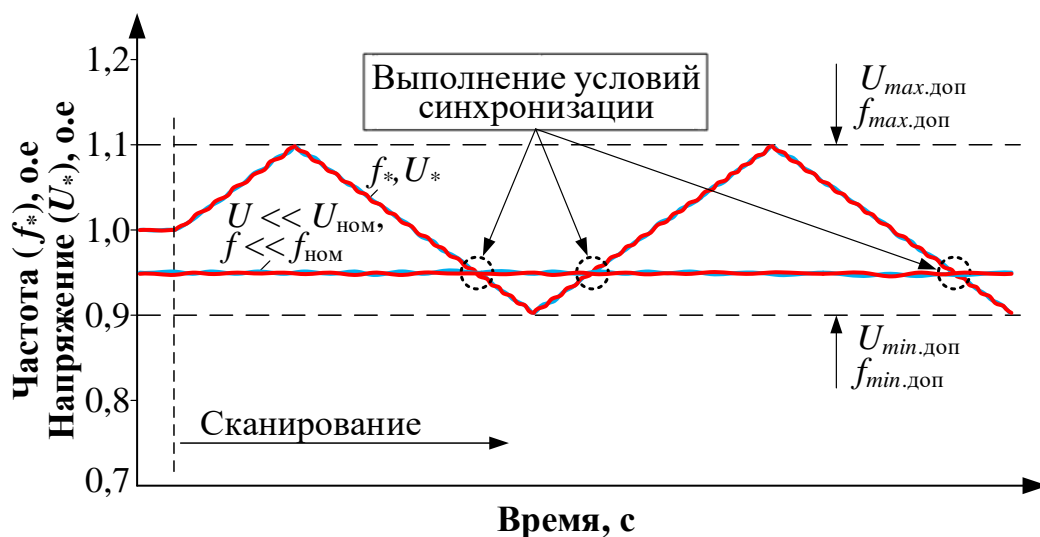


Рисунок 6 – Сканирование выполнения условий синхронизации

При осуществлении сканирования в частях сети со сбалансированным классом при синхронизации с другими классами с гармонизированными параметрами обязательно появляются точки их пересечения, что естественно приводит к выполнению условий синхронизации, вследствие чего срабатывают пусковые органы устройств улавливания синхронизма, включая объединяющий коммутационный аппарат (выключатель, реклоузер).

Критические параметры процесса сканирования условий синхронизации

Успешность синхронизации определяющим образом зависит от параметров процесса сканирования его условий, к числу которых следует отнести:

- *Диапазон согласованного изменения частоты и напряжения* определяется предельно возможными их установившимися отклонениями в послеаварийных режимах. Для частей изолированно работающих энергосистем малой мощности или активных сетей можно ориентироваться на отклонения $\pm 3-4\%$.

- *Форма периодического изменения* предпочтительна линейная, т.к. пересечения линейных функций всегда будут происходить при постоянстве угла, т.е. постоянстве

изменения взаимного скольжения синхронизируемых векторов, независимо от места их пересечения (значения совпадающих частот).

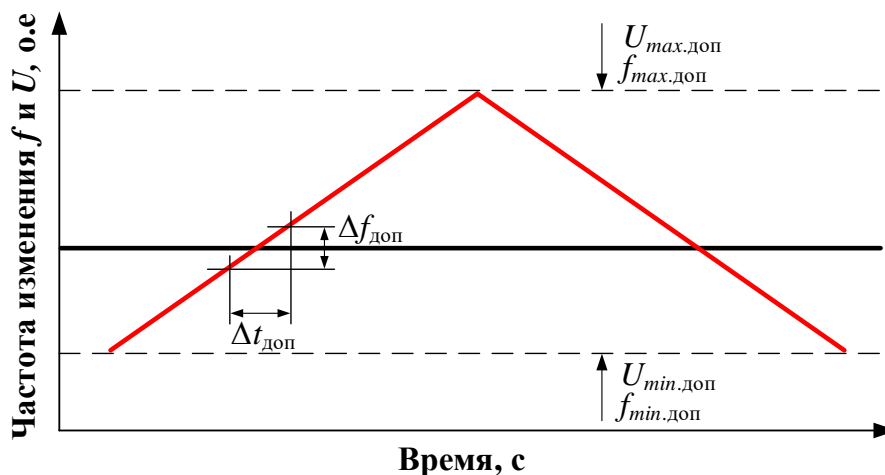


Рисунок 7 – Взаимосвязь критических параметров сканирования условий синхронизации

• Частота (период) изменения частоты и напряжения при сканировании определяется условием обязательности прохождения взаимным углом синхронизируемых векторов через 0 на интервале изменения скольжения $\pm S_{доп}$ (например, при $\pm 0,1$ Гц/с), что означает проворот угла на 360 град при изменении скольжения в указанном диапазоне.

Данные условия графически можно представить следующим образом (Рисунок 7).

Крутизна характеристики сканирования (ХС)

$$K = \frac{\Delta f}{\Delta t} \quad (3)$$

Условия для определения критической (максимальной) взаимной крутизны пересекающихся ХС (Рисунок 8)

$$\begin{cases} K_{доп} = \frac{\Delta f_{доп}}{\Delta t_{доп}} \\ \Delta \delta_{треб} = 360^\circ \end{cases} \quad (4)$$

где $K_{доп} = K_1 - K_2$ – взаимная крутизна пересекающихся ХС, $\Delta \delta_{треб}$ – проворот взаимного угла на 360 град на интервале изменения $\Delta f = \Delta f_{доп}$ для гарантированного выполнения 3-го условия (равенства углов).

Определим $\Delta t_{доп}$ из условия

$$\Delta \delta_{треб} = \int_0^{\Delta t_{доп}} \Delta \omega(t) dt = 360 \int_0^{\Delta t_{доп}} \Delta f(t) dt = 360 \int_0^{\Delta t_{доп}} Kt dt = 360 \frac{Kt^2}{2} \Big|_0^{\Delta t_{доп}} = 360^\circ \quad (5)$$

Получим $\Delta t_{треб}$ из уравнения 5 с учетом $K = \Delta f / \Delta t$

$$360 = 360 \frac{\Delta f_{доп}}{\Delta t_{доп}} \cdot \frac{\Delta t_{доп}^2}{2} = 180 \cdot \Delta f_{доп} \cdot \Delta t_{доп} \quad (6)$$

Отсюда

$$\Delta t_{треб} = \Delta t_{доп} = \frac{360}{180 \cdot \Delta f_{доп}} \quad (7)$$

Получим для $\Delta f_{\text{доп}} = 0,2 \text{ Гц } (\pm 0,1 \text{ Гц})$

$$\Delta t_{\text{доп}} = \frac{360}{180 \cdot 0,2} = 10 \text{ с}$$

$$K_{\text{доп}} = \frac{\Delta f_{\text{доп}}}{\Delta t_{\text{доп}}} = \frac{0,2 \cdot 360}{10} = 7,2 \text{ } ^\circ/\text{с}$$
(8)

т.е. критическая длительность нахождения скольжения в допустимой зоне $0,2 \text{ Гц } (\pm 0,1 \text{ Гц})$ равна 10 с .

При этом угол провернется на 360 град.

Длительность прохождения частотой всего диапазона сканирования (например, 2 Гц) составит 100 с .

Полный период сканирования будет равен 200 с , т.е. частота сканирования для гарантированного выполнения всех условий синхронизации будет равна $0,02 \text{ Гц}$.

• *Фазовое смещение изменений при одновременном сканировании генераторов в разных разделенных частях сети* – смещение в форме трапеции гарантированно создаст выполнимость условий синхронизации. На рисунке 8 представлены характеристики сканирования (ХС) для 4-х частей сети, причем для гарантированного создания условий синхронизации всех частей сети в первом полупериоде (точек пересечения ХС) необходимо создать фазовые смещения ХС.

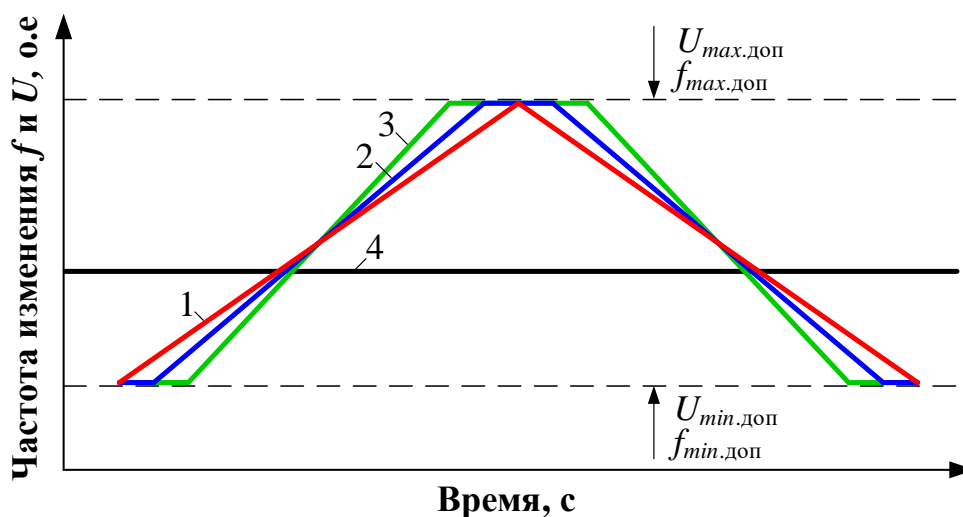


Рисунок 8 – Статические характеристики сканирования условий синхронизации для 4-х активных частей сети, одна из которых пассивна при сканировании ($K=0$)

Экспериментальное исследование способа синхронизации на физической электродинамической модели

Экспериментальное исследование способа децентрализованной синхронизации было проведено на электродинамической модели (ЭДМ) центра коллективного пользования «Центр испытаний устройств контроля и управления режимами электроэнергетических систем» при Новосибирском государственном техническом университете.

В эксперименте были использованы модельные энергоблоки с генераторами Г1 и Г2 мощностью 3 кВА каждый с линейным напряжением 220 В ; линии электропередач ЛЭП-1 и ЛЭП-2; выключатели В1-В3; осветительная нагрузка Н1 мощностью 700 Вт , и нагревательная нагрузка мощностью 350 Вт (Рисунок 9).

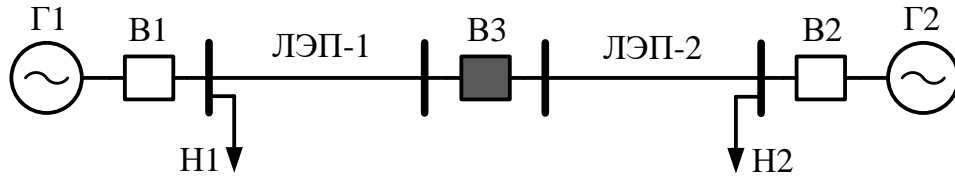


Рисунок 9 – Структурная схема экспериментальной установки, имитирующая две разделенные части сети с наличием генерации

В качестве блока управления для осуществления низкочастотного периодического изменения частоты и напряжения на генераторах использовался многофункциональный блок комплекса противоаварийной автоматики (КПА-М). Основными функциями блока, используемыми в процессе проведения эксперимента, являются: исполнение технологического алгоритма, управление заданным количеством выходных реле, осциллографирование процессов, регистрация событий, накопление данных в энергонезависимой памяти, сигнализация срабатывания и др.

На рисунке 10 приведены осциллограммы процесса синхронизации, где в одной части сети генератором Г1 осуществлялась гармонизация и сканирование режимных параметров с периодом колебания 120 с, а в другой части гармонизация генератором Г2, с пониженными режимными параметрами ($f = 48$ Гц, $U = 116$ В). При пересечении режимных параметров двух частей и выполнении условий синхронизации происходило автоматическое включение выключателя В3.

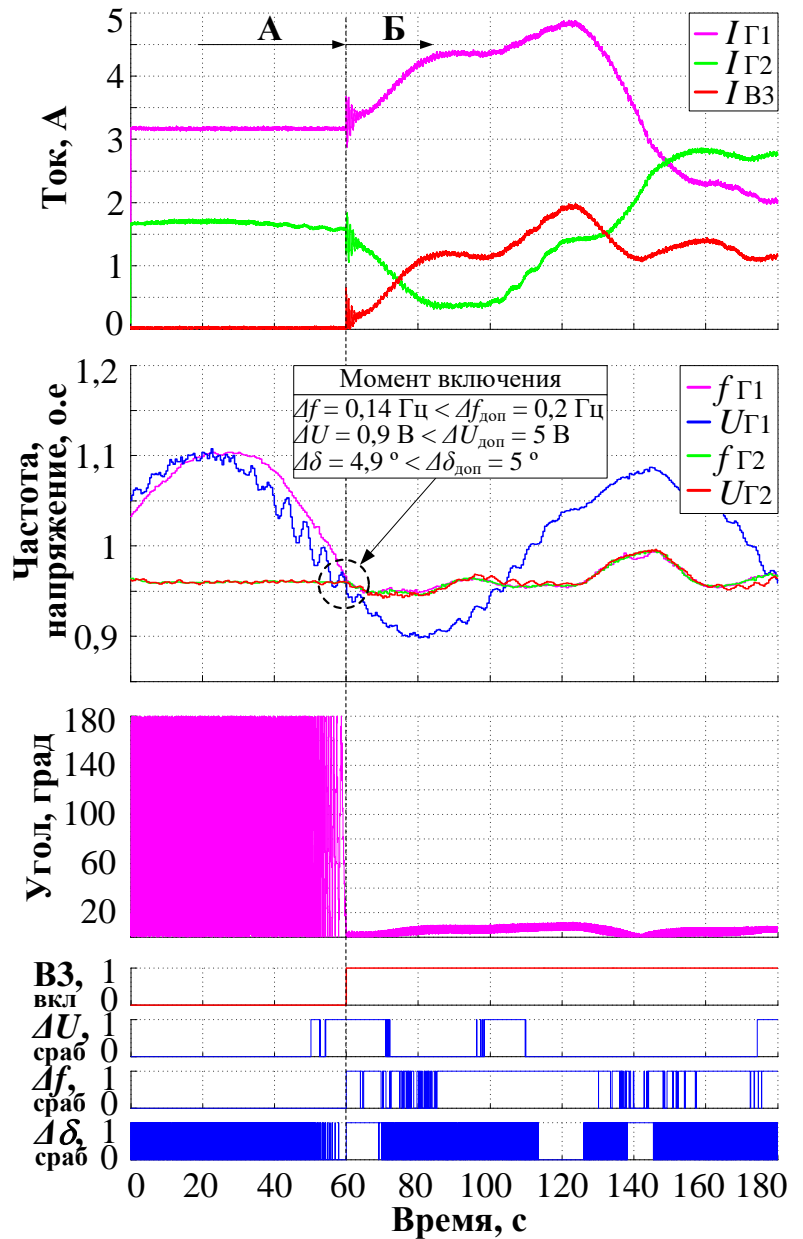


Рисунок 10 – Осциллограммы процесса синхронизации при сканировании генератором Г1 с периодом 120 с, и с пониженными $f = 48$ Гц и $U = 116$ В генератора Г2 (А – режим сканирования условий синхронизации, Б – режим параллельной работы с продолжающимся сканированием)

Признаком наступления параллельной работы служило возникновение затухающих колебаний с частотой электромеханического переходного процесса при включении генераторов на параллельную работу.

Исследование особенностей и возможности реализации способа децентрализованной синхронизации MicroGrid было также проведено на простых микроконтроллерах (МК).

В качестве управляющих контроллеров использованы широко распространенные микроконтроллеры семейства ATmega (Arduino).

Управление было реализовано на двух МК. Один из МК выполнял функции идентификации разделения сети на части, нормализации напряжения и частоты в каждой из MicroGrid после разделения, подачи периодических (сканирующих) сигналов управления мощностью и возбуждением на каждый из генераторов, идентификацию удаленного включения генераторов на параллельную работу с прекращением режима сканирования. Второй МК контролировал выполнение условий синхронизации на удаленном выключателе (нормальность напряжений, допустимость разницы частот, модулей и фазы напряжений) и выдавал команду на его включение.

По результатам экспериментов был сделан вывод о недостаточной производительности микроконтроллеров, приводившей к запаздыванию при считывании кода (скетча), однако функциональность управления обеспечивалась на уровне допустимой “грубой” синхронизации.

Третья глава посвящена испытанию разработанного прототипа автоматики децентрализованного восстановления целостности и нормального режима электрической сети с множеством распределенных MicroGrid после аварийно или противоаварийного разделения сети на части.

Основные этапы децентрализованного управления восстановлением следующие:

1. Последовательное срабатывание АПВ сетевых выключателей;
2. Согласование (нормализация) отклонений частоты и напряжения в активных частях сети;
3. Осуществление сканирования условий синхронизации на электростанциях с резервом регулирования;
4. Осуществление АПВ сетевых выключателей с улавливанием синхронизма;
5. Восстановление баланса мощностей в каждой синхронизированной паре активных частей электрической сети;
6. Осуществление, при необходимости, смены ведущей по частоте электростанции.

Алгоритм управления генерирующей установкой MicroGrid при децентрализованном восстановлении активной сети приведен на рисунке 11.

Для идентификации факта восстановления параллельной работы частей активной сети при их включении на параллельную работу может быть использован признак возникновения в токе (мощности) генераторов затухающих колебаний, соответствующих возникновению переходного электромеханического процесса (Рисунок 12).

Колебательный процесс в токе генератора выявляется либо частотным фильтром, либо по возникновению множества изменений знака отклонения тока относительно среднего значения. При анализе экспериментальных осциллограмм было определено, что при включении на параллельную работу частота колебаний ($f_{\text{кол}}$) тока включения составляла 0,83 – 1,32 Гц, а время затухания (t_3) колебательного процесса 5 – 10 с.

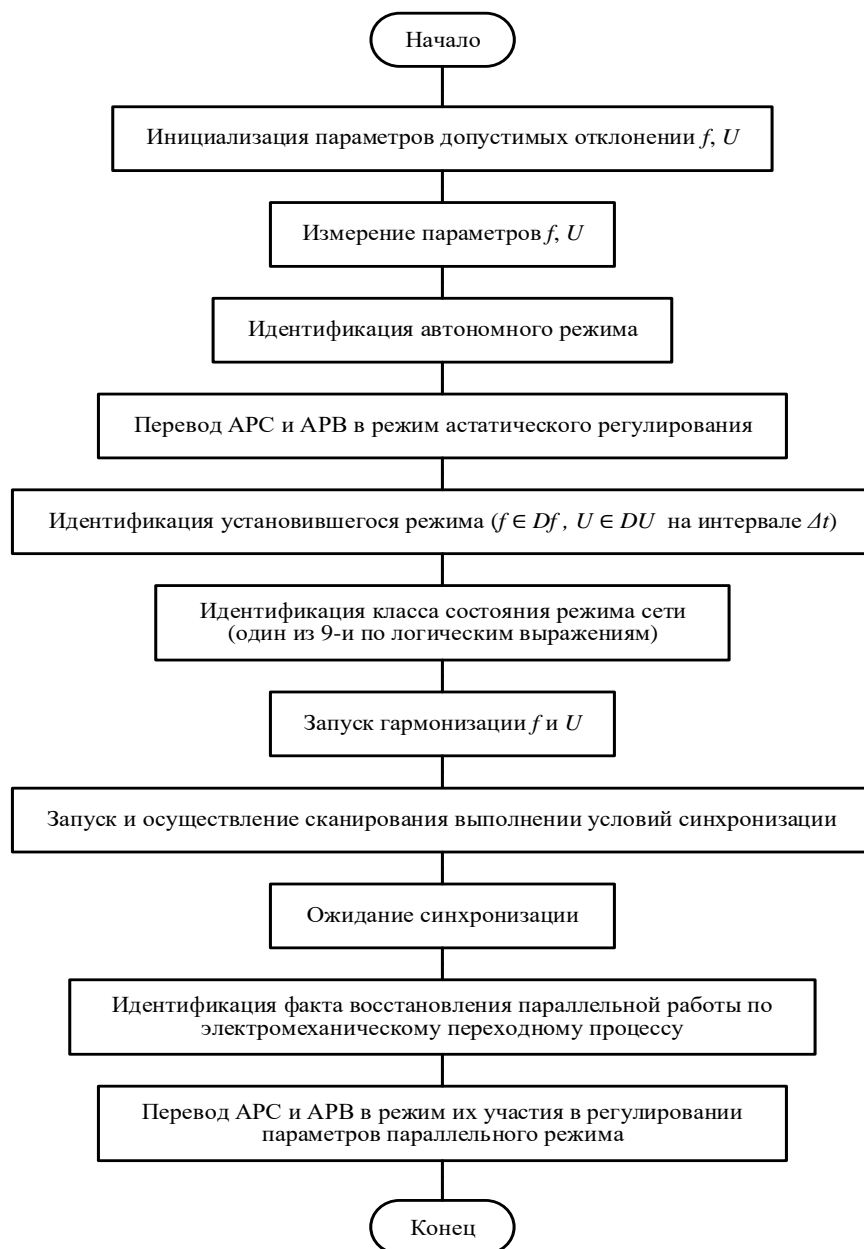


Рисунок 11 – Алгоритм управления генерирующей установкой при децентрализованном восстановлении целостности и нормального режима активной сети после аварийного разделения

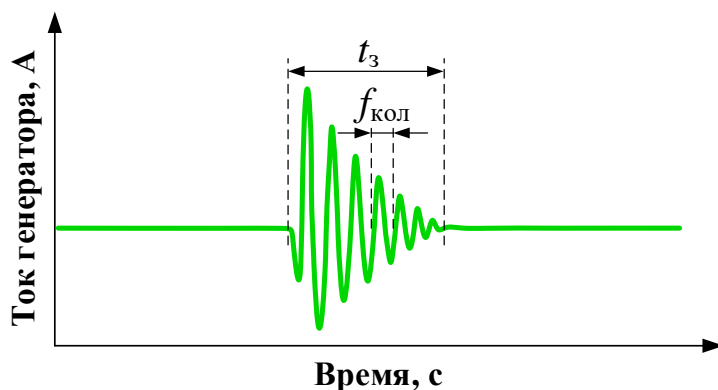


Рисунок 12 – Колебательный процесс в токе генератора при включении на параллельную работу (пример из обработки множества осциллограмм)

Экспериментальное исследование и испытание прототипа автоматики децентрализованного восстановления целостности и нормального режима сети с несколькими MicroGrid на физической электродинамической модели энергосистемы

Схема экспериментальной электрической сети с тремя MicroGrid представлена на рисунке 13.

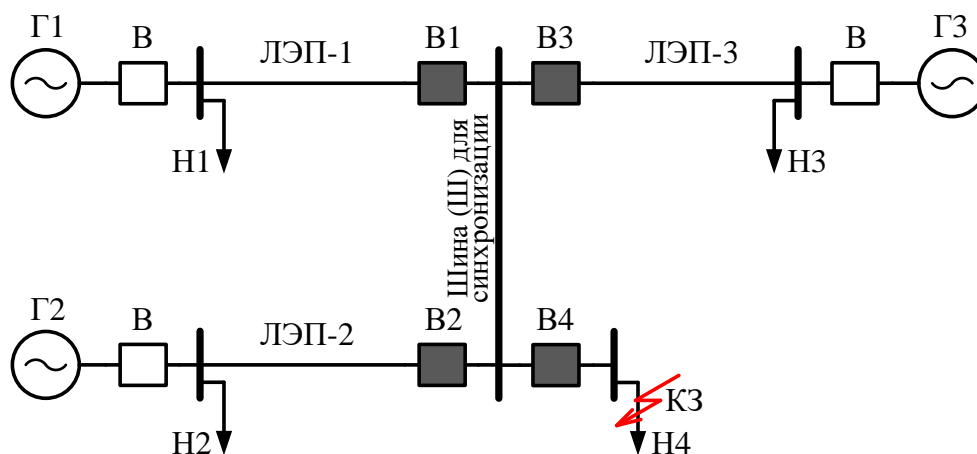


Рисунок 13 – Схема экспериментальной установки, имитирующая сеть с тремя активными и одной пассивной частями сети

Выключатели В1-В3 моделировали удаленные сетевые коммутационные аппараты для осуществления разделения сети при возникновении КЗ и синхронизации MicroGrid при восстановлении ее целостности, а выключатель В4 служил для создания кратковременного КЗ.

На рисунке 14 представлен фото физической модели, использованной при исследовании способа управления и испытании прототипа автоматики.

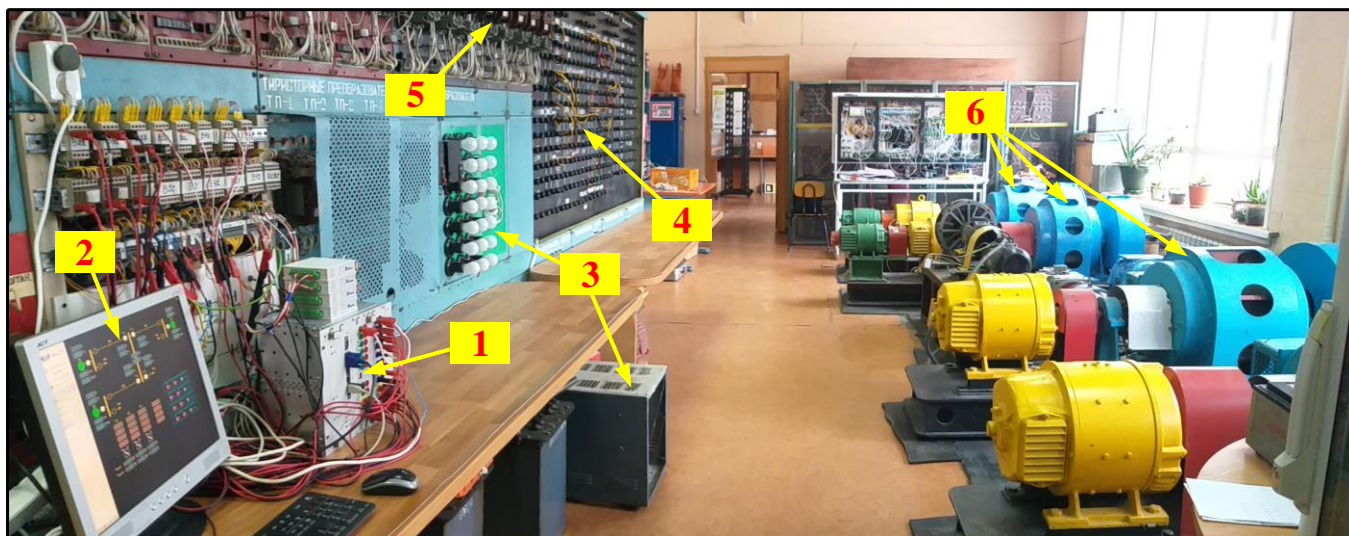


Рисунок 14 – Общий вид модели (1 – блок управления; 2 – интерфейс программы; 3 – нагрузки; 4 – наборное поле; 5 – выключатели; 6 – модельные синхронные машины)

На рисунках 15, 16 приведены характерные осциллограммы, полученные в ходе эксперимента.

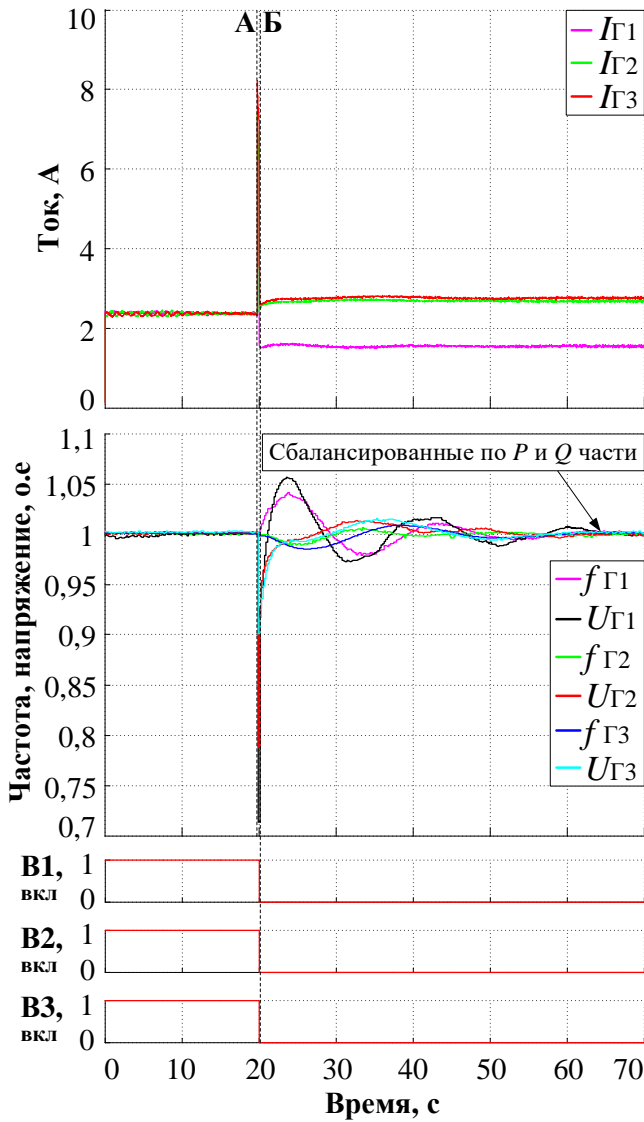


Рисунок 15 – Осциллограммы процесса аварийного разделения активной сети на три сбалансированных по активной и реактивной мощности части (А – возникновение короткого замыкания, Б – разделение на части с переводом регуляторов в режим астатического регулирования частоты и напряжения)

На рисунке 15:

В момент времени А возникает трехфазное КЗ. По факту срабатывания пусковых органов защит, в частности, защит с пуском по снижению напряжения и увеличению тока в контролируемых точках шины Ш выдается сигнал и

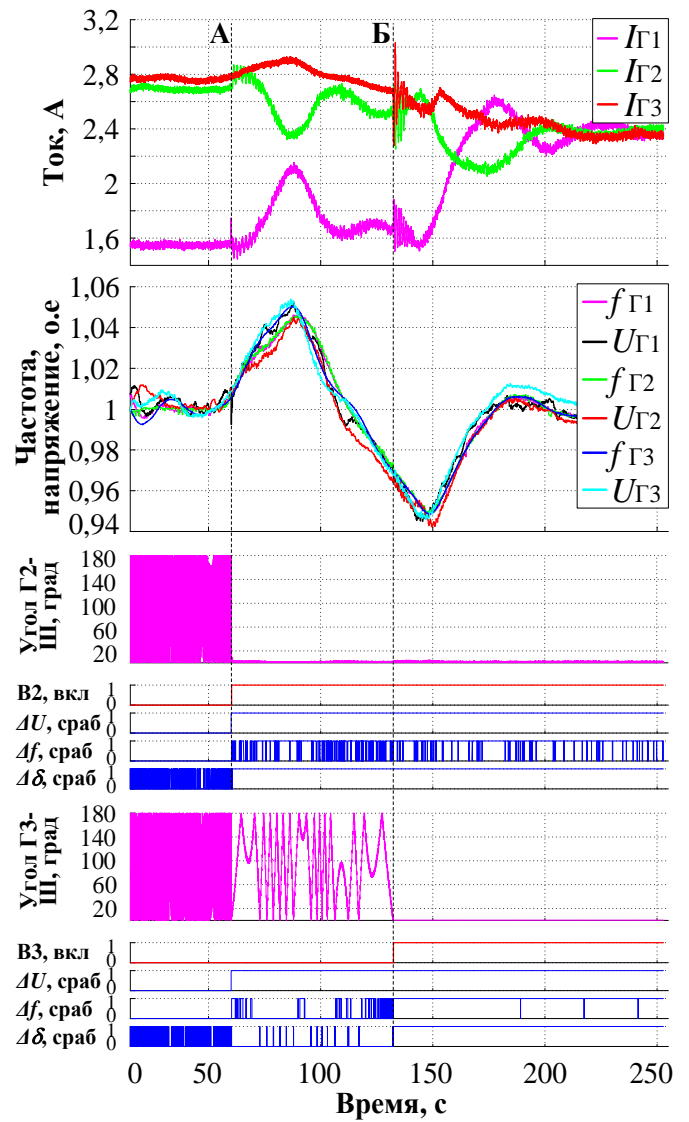


Рисунок 16 – Осциллограммы процесса синхронизации и восстановления параллельной работы трех сбалансированных по активной и реактивной мощности разделенных частей (А – параллельная работа генератора Г1 с Г2, Б – параллельная работа генератора Г3 с Г1 и Г2; ΔU , Δf , $\Delta \delta$ – индикаторы выполнения условий синхронизации)

отключаются выключатели В1-В4 (момент времени Б). Контроллеры генераторов, идентифицируя автономную работу по факту изменения частоты, срабатывания защиты минимального напряжения, переводят регуляторы генераторов в режим астатического регулирования частоты и напряжения. Регуляторы балансируют разделившиеся части за время около 40-50 с.

Далее на рисунке 16 после наступления установившегося режима, контроллеры запускают режим сканирования условий синхронизации на всех генераторах. При сканировании, в момент времени А при выполнении условий синхронизации АПВ с улавливанием синхронизма выключателя В2 включает генератор Г2 на параллельную работу с генератором Г1, который исходно был включен на шину Ш. При включении Г1 и Г2 на параллельную работу, по факту возникновения электромеханических колебаний в токе генераторов, регуляторы генератора Г1 переводятся в режим астатического регулирования частоты и напряжения, а генератора Г2 – в режим поддержания заданной мощности. При этом генератор (Г3) продолжает сканирование.

При наступлении момента синхронизма (момент времени Б) АПВ с улавливанием синхронизма выключателя В3 включает генератор Г3 на параллельную работу с генераторами Г1 и Г2. По факту возникновения электромеханических колебаний в токе генераторов, регуляторы генератора Г3 также переводятся в режим поддержания заданной мощности. Децентрализованное восстановление параллельной работы распавшихся частей активной сети выполнено.

В четвертой главе представлены результаты анализа текущего состояния малой энергетики Таджикистана для оценки перспективности формирования активных электрических сетей с распределенной малой генерацией, основу которой составляют малые гидроэлектростанции (МГЭС).

Таджикистан - страна, которая имеет огромный запас гидроресурсов. По данному показателю страна стоит на первом месте среди стран Центральной Азии, и на восьмом месте – в мире. Гидроэнергетический потенциал страны в области выработки электроэнергии превышает 527 млрд. кВт·ч в год. На сегодняшний день, Таджикистан использует приблизительно 6,6 % своего гидроэнергетического потенциала. Потенциальные запасы малой гидроэнергетики в стране составляют 184,46 млрд. кВт·ч в год.

Также представлены результаты исследования применения модифицированного алгоритма синхронизации для “мягкого” включения MicroGrid на параллельную работу с внешней сетью для одной из существующей сети Рушанского района Горно-Бадахшанской автономной области Таджикистана.

Моделирование выполнялось на ПК Rustab – RastrWin3. Характерные результаты моделирования синхронизации MicroGrid с внешней сетью при обычной синхронизации приведены на графике рисунка 17, а с использованием предложенного алгоритма (с использованием уравнений 1 и 2) – на графике рисунка 18.

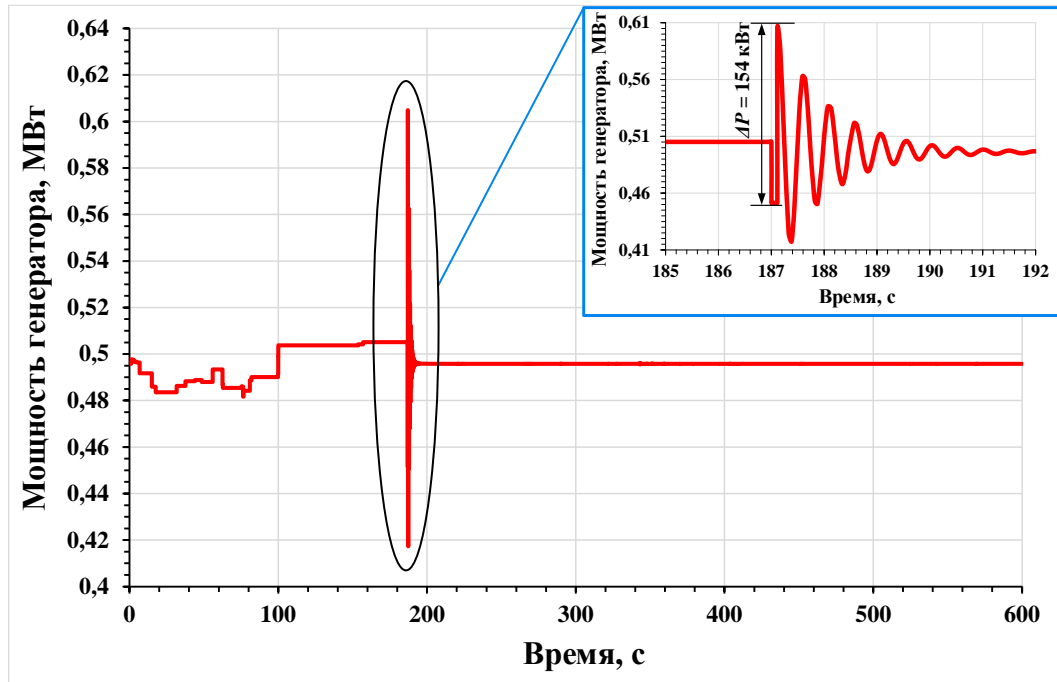


Рисунок 17 – График мощности генератора в случае смены знака взаимного угла после выдачи команды на включение выключателя при обычной синхронизации

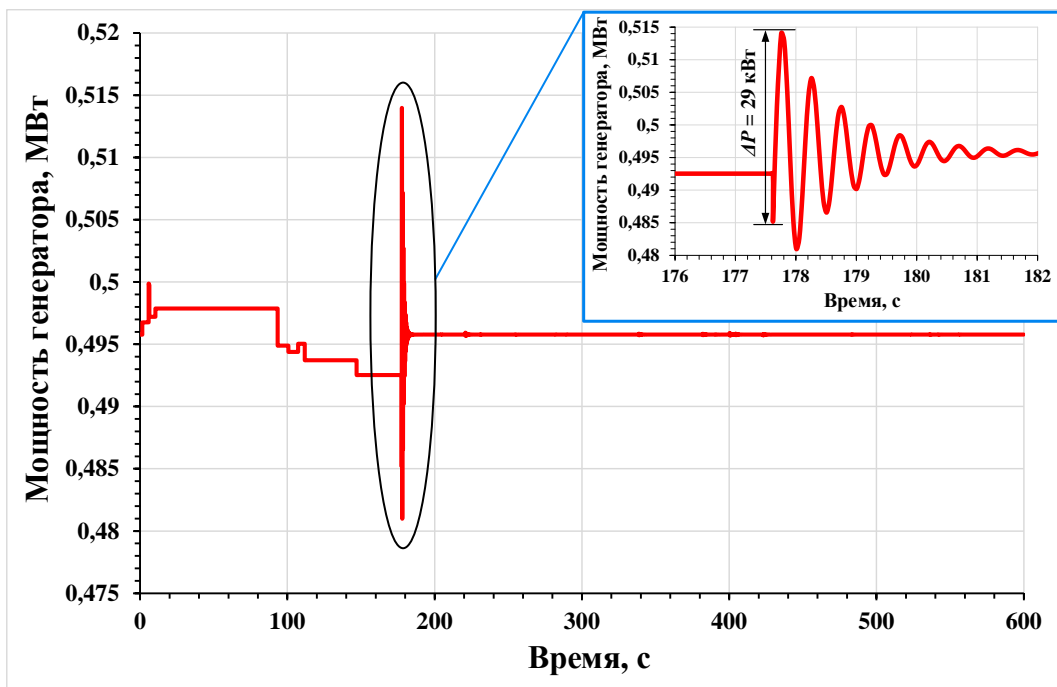


Рисунок 18 – График мощности генератора с использованием алгоритма мягкой синхронизации

В представленном примере синхронизация и включение MicroGrid на параллельную работу по предложенному алгоритму осуществлялось при угле $\delta = 0,3^\circ$. При этом, скачок мощности генератора составил $\Delta P = 29$ кВт вместо 154 кВт.

Проведенные расчеты подтвердили, что рассмотренный алгоритм решает задачу мягкой синхронизации MicroGrid с внешней сетью.

В приложениях к диссертации приведены параметры модельных энергоблоков, уставки КПА-М, осциллограммы децентрализованной синхронизации MicroGrid на микроконтроллерах, сведения о малых гидроэлектростанциях

Таджикистана, карта настроек защит энергоблоков Caterpillar, патент на изобретение и акты о внедрении результатов диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Предложен способ децентрализованной синхронизации и восстановления нормального режима аварийно разделенной электрической сети с генераторами и разработаны алгоритмы, осуществляющие специальное управление мощностью и возбуждением генераторов в процессе синхронизации;

2. Разработан прототип автоматики, которая без обмена данными осуществляет децентрализованное управление синхронизацией и восстановление целостности сети после ее распада на работоспособные части;

3. Разработан модифицированный алгоритм улавливания синхронизма для синхронизации Микрогрид с внешней электрической сетью большой мощности;

4. Экспериментально подтверждена работоспособность предложенных способов и алгоритмов децентрализованного управления синхронизацией на физической модели.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Фишов А.Г. Анализ состояния и направление развития малой гидроэнергетики Таджикистана / А.Г. Фишов, А.Х. Гуломзода, Л.С. Касобов // Политехнический вестник. Серия: инженерные исследования. – 2019. – № 1 (45). – С. 13 – 22.

2. Фишов А.Г. Децентрализованная реконфигурация электрической сети с Microgrid с использованием реклоузеров / А.Г. Фишов, А.Х. Гуломзода, Л.С. Касобов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2020. – Т. 24, № 2. – С. 382 – 395.

3. Гуломзода А.Х. Модифицированный способ синхронизации Microgrid с внешней изолированной энергосистемой / А.Х. Гуломзода, М.Х. Сафаралиев, Е.А. Люханов // Электротехнические системы и комплексы. – 2021. – № 3 (52). – С. 72 – 80.

4. Синхронизация Microgrid с внешней электрической сетью и между собой в нормальных и послеаварийных режимах при разных схемах объединения / А.Г. Фишов, А.Х. Гуломзода, Е.С. Ивкин, Р.Ю. Семендяев // Релейная защита и автоматизация. – 2021. – № 2 (43). – С. 32 – 42.

Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science:

5. Recloser-Based Decentralized Control of the Grid with Distributed Generation in the Lahsh District of the Rasht Grid in Tajikistan, Central Asia / A. Ghulomzoda, A. Gulakhmadov, A. Fishov [et al.] // Energies. – 2020. – Vol. 13, iss. 14. – Art. 3673 (19 p.).

6. A Novel Approach of Synchronization of Microgrid with a Power System of Limited Capacity / A. Ghulomzoda, M. Safaraliev, P. Matrenin [et al.] // Sustainability. – 2021. – Vol. 13, iss. 24. – Art. 13975 (17 p.).

Патент на изобретение:

7. Патент 2752693 Российская Федерация, МПК H02J3/42. Способ удаленной синхронизации и восстановления нормального режима аварийно разделенной электрической сети с генераторами / А.Г. Фишов, **А.Х. Гуломзода**; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет». – заявл. 28.09.2020; опубл. 30.07.2021; Бюл. № 22. – 10 с.

Публикации в сборниках материалов и трудов научных конференций:

8. **Gulomzoda A. H.** Technology of Managing the Modes of Local Energy Supply Systems / А.Н. Gulomzoda, А.Г. Fishov, S.V. Nikroshkina // Science. Research. Practice: тр. 2 Всерос. науч. -практ. конф. аспирантов и магистрантов, Новосибирск, 20 дек. 2018 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – С. 70 – 72.

9. **Gulomzoda A. H.** Development of small-scale hydropower generation in Tajikistan / А.Н. Gulomzoda, А.Г. Fishov, S.V. Nikroshkina // Progress through Innovations: тр. 8 междунар. науч. -практ. конф. аспирантов и магистрантов, Новосибирск, 28 марта 2019 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – С. 123 – 126.

10. **Гуломзода А.Х.** Способы управления режимами Microgrid / А.Х. Гуломзода, К.Х. Гулямов, Х.Х. Зайнуддинов // Энергетика региона: Состояние и перспективы развития: материалы междунар. научно – практ. конф., Душанбе, 20-21 декабря 2019 г. / Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими. – Душанбе, 2019. – С. 123 – 127.

11. **Гуломзода А.Х.** Исследование способа синхронизации с внешней сетью локальных систем электроснабжения на базе малой генерации / А.Х. Гуломзода // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: сборник научных трудов 93-го заседания Международного научного семинара имени Ю.Н. Руденко. – Издательство: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, 2021. – С. 303 – 312.

12. **Гуломзода А.Х.** Синхронизация и восстановление параллельной работы Microgrid с внешней сетью / А.Х. Гуломзода, И.А. Кувватов, А. Мирзоев // Энергетика: Состояние и перспективы развития: материалы междунар. научно – практ. конф., Душанбе, 20 декабря 2021 г. / Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими. – Душанбе, 2021. – С. 106 – 112.

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 № 01169. Подписано в печать 04.07.2022 г.