

На правах рукописи



**СВОЙСТВА И РЕЖИМЫ ОБЪЕДИНЕННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ МАЛОЙ
МОЩНОСТИ, СОЗДАВАЕМЫХ НА ОСНОВЕ ЛОКАЛЬНЫХ СИСТЕМ
ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ**

Какоша Юрий Васильевич

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук по специальности
2.4.3 – Электроэнергетика

Новосибирск
2024

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

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

Официальные оппоненты: **Илюшин Павел Владимирович,**
доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт энергетических исследований Российской академии наук (г. Москва), центр интеллектуальных электроэнергетических систем и распределенной энергетики, руководитель центра;

Булатов Юрий Николаевич, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Братский государственный университет» (г. Братск), 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 «10» октября 2024 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.347.05 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. 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 «___» августа 2024 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 Локальных интеллектуальных энергосистем (ЛИЭС или MiniGrid) и их интеграция, как в существующие централизованные электрические сети, так и создание на основе ЛИЭС объединенных энергосистем малой мощности (ОЭСММ). Использование технологии ОЭСММ позволяет устранить локальные дефициты мощности в точках примыкания к внешней электрической сети, обеспечивает возможность снижения потерь электроэнергии за счет сокращения дальности передачи электроэнергии (снижение потерь), повышает надежность системы энергоснабжения, позволяет повысить инвестиционную привлекательность за счет небольших сроков строительства энергообъектов, устраняет проблемы ограничения выдачи и потребления мощности в местах присоединения к централизованной энергосистеме, повышает экономическую эффективность применения генерирующего оборудования, включая снижение необходимого резерва мощностей в различных режимах.

Актуальность темы исследования обусловлена ростом количества объектов с МГ и стремлением их собственников к решению проблемы низкой надежности энергоснабжения и качества электроэнергии, как путем включения их на параллельную работу с системой централизованного энергоснабжения (ЦЭС), так и создания ОЭСММ.

Для решения данной задачи необходима разработка технологии децентрализованного управления ОЭСММ, которая обеспечивала бы автоматическое поддержание параметров режимов ОЭСММ в заданных пределах, обеспечивая эффективное и надежное функционирование. При необходимости, ОЭСММ должны иметь возможность быть интегрированы в системы ЦЭС.

Создание ОЭСММ может исключить необходимость преодолевать нормативные и административные барьеры на пути интеграции ЛИЭС в существующие электрические сети централизованного энергоснабжения для достижения положительных системных эффектов от объединения путем создания независимых энергосистем, обладающих собственной автономностью, высокой надежностью электроснабжения потребителей, экономичностью выработки, передачи и распределения энергии.

Основная идея диссертационной работы - создание теоретических и технологических основ проектирования ОЭСММ, обеспечивающих выполнение требований к «свободному» (Plug and Play) и малозатратному их объединению с получением системных эффектов на уровне объединения MiniGrid с энергосистемами централизованного энергоснабжения.

Комплексность работы состоит в рассмотрении задач противоаварийного, режимного управления и автооперирования ОЭСММ в увязке с техническими решениями в части схемы выдачи мощности и новых способов управления.

Степень разработанности темы исследования. Тематика научных работ в области распределённой МГ и ЛИЭС в России на сегодняшний день довольно разнообразна. Среди основных научных направлений исследований в этой области можно выделить следующие: проблемы и перспективы развития МГ в России, синхронизация объектов с МГ и ЛЭС с внешней сетью, использование МГ в системах электроснабжения промышленных предприятий, влияние распределенной МГ 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., Фишов А.Г., Куликов А.Л., В.И., Паздерин А.В., Обоскалов В.П., Марченко А.И., Андреев М.В., Фёдоров В.К., 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., Ерошенко С. А, Исмоилов С.Т., Кац П.Я., Короткевич М.А., Кубарьков Ю.П., Курбацкий В.Г., Ландман А.К., Мукатов Б.Б., Мышкина Л.С., Нагай В.И., Пантелеев В.И., Рогозинников Е. И., Суворов А.А., Тутундаева Д.В., Фахразиева И.З., Фролов М.Ю., Фурсанов М.И., Шиллер М.А., Энхсайхан Э.Э, Семендяев Р.Ю., Ивкин Е.С. и др.

Стоит отметить, что за рубежом тематика исследований в области распределенной МГ и MicroGrid 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 теоретических основ создания и способов управления режимами ЛИЭС с синхронной МГ, объединенных в энергосистемы малой мощности (ОЭСММ).

Задачи для достижения цели диссертационной работы:

1. Анализ особенностей работы ОЭСММ на основе ЛИЭС в островном и параллельном с системой ЦЭС режимах;
2. Разработка технических решений для создания на основе ЛИЭС ОЭСММ и управления их режимами;
3. Разработка способов управления режимами ОЭСММ;
4. Разработка методики исследования системных свойств ОЭСММ;
5. Исследование системных свойств ОЭСММ;
6. Выявление и анализ реальных условий создания ОЭСММ на основе примеров анализа и проектирования энергосистем малой мощности.

Объект исследования: локальные интеллектуальные энергосистемы, объединяемые в ОЭСММ.

Предмет исследования: способы управления режимами ОЭСММ, особенности их проектирования, методики моделирования и оценки системных свойств.

Научная новизна диссертации:

1. Впервые введено понятие ОЭСММ на базе нескольких ЛИЭС, предложен способ адаптивного участия электростанций ЛИЭС в ОПРЧ при их создании и управлении режимами.
2. Предложена структура системных эффектов от создания ОЭСММ, исследованы их технологические особенности и перспективность использования.
3. Разработана методика экспертной сравнительной оценки системных свойств и эффективности интеграции ЛИЭС с системами ЦЭС или объединения в ОЭСММ.

Теоретическая и практическая значимость работы. Решена научно-техническая задача по созданию теоретических основ проектирования и управления режимами ОЭСММ.

Способ адаптивного первичного регулирования частоты в ЛИЭС защищен патентом РФ, нашел отражение в картах настройки системной автоматики реального объекта, что позволило стабилизировать загрузку генерирующего оборудования электростанции и, при этом, обеспечило требуемое участие генерации ЛИЭС в общем первичном регулировании частоты (ОПРЧ) ЕЭС.

Методология и методы исследования. При выполнении работы использованы методы математического моделирования переходных процессов, реализованные на единой платформе расчетов и анализа электроэнергетических систем DIGSILENT POWERFACTORY. Используются теории устойчивости и управления режимами электроэнергетических систем, автоматического и автоматизированного управления.

Положения, выносимые на защиту:

1. Объединение ЛИЭС в ОЭСММ позволяет создавать положительные системные эффекты по надежности энергоснабжения и экономичности использования генерирующего оборудования, близкие к эффектам от их интеграции в системы централизованного энергоснабжения.

2. Развитие районных систем энергоснабжения путем объединения ЛИЭС с созданием ОЭСММ позволяет радикально упростить структуру их системообразующих электрических сетей при условиях обеспечения требуемой надежности энергоснабжения потребителей и высокой экономичности использования генерирующего оборудования.

3. В ОЭСММ экономически целесообразно и технологически возможно децентрализованное мультиагентное управление режимами.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 2.4.3 – Электроэнергетика, в частности следующим направлениям исследования:

– пункту № 14. Разработка методов расчета и моделирования установившихся режимов, переходных процессов и устойчивости электроэнергетических систем и сетей, включая технико-экономическое обоснование технических решений, разработка методов управления режимами их работы;

– пункту № 18. Разработка методов анализа структурной, балансовой и функциональной надежности электроэнергетических систем и систем электроснабжения, мини- и микрогрид.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов подтверждена использованием промышленной программы для имитационного моделирования, привлечением экспертов к оценке обоснованных в работе системных эффектов от объединения ЛИЭС в ОЭСММ, их интеграции с системами ЦЭС, согласованностью экспертных оценок.

Результаты диссертации докладывались автором на: научных семинарах кафедры автоматизированных электроэнергетических систем НГТУ и следующих конференциях: Международной научно-практической конференции «Альтернативная и интеллектуальная энергетика», 2018; 54 International universities power engineering conference (UPEC), Romania, Bucharest 2019; «Энергетика XXI

века: Устойчивое развитие и интеллектуальное управление», г. Иркутск, 2020; International Conference on Modern Power Systems (MPS), Romania, Cluj-Napoca, 2021.

Благодарность. Автор выражает свою глубокую благодарность сотрудникам кафедры автоматизированных электроэнергетических систем НГТУ за помощь в решении задач диссертации.

Публикации. Результаты диссертационной работы опубликованы в 10 научных работах, из них работ, опубликованных 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) – 3, патентов РФ – 1.

Результаты работы использованы в обучающем дистанционном курсе для магистрантов Новосибирского государственного технического университета «Инновационные технологии в электроэнергетике», что подтверждается соответствующим актом о внедрении в учебный процесс.

Личный вклад автора. Личный вклад соискателя состоит в: получении результатов, изложенных в диссертации, в анализе особенностей работы ОЭСММ на основе ЛИЭС в островном и параллельном с энергосистемой централизованного энергоснабжения режимах, исследовании системных свойств ОЭСММ, разработке методики сравнительной оценки вариантов объединения ЛИЭС, поиске и анализе реальных условий создания ОЭСММ, формулировании выводов исследования. Доля участия в опубликованных в соавторстве работах составляет не менее 50 %.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений, списка терминов и определений, списка литературы, включающего 105 наименований, и пяти приложений. Общий объем работы составляет 168 страниц, включает 58 рисунков и 23 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 темой работы мировые тренды развития электроэнергетики, такие как открытые энергосистемы, производство энергии в местах его потребления, а также используемые в них мировым сообществом понятия. В России, из-за специфических особенностей, таких как масштабная газификация и потребности в большом количестве тепловой энергии, просматривается тренд преимущественного 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 – *Локальные интеллектуальные энергосистемы (ЛИЭС), мини – и микрогрид.*

В главе приводятся виды объектов с МГ с различными назначениями и требованиями к системной автоматике и энергоисточнику, из которых выделяется локальная система энергоснабжения (ЛСЭ), имеющая большие недостатки при автономной работе в виде низкой надежности электроснабжения потребителей,

качества электроэнергии, эффективности использования генерирующего оборудования. Принципиально их можно устранить путем включения ЛСЭ на параллельную работу с централизованной энергосистемой, а именно путем создания на базе ЛСЭ ЛИЭС, способных работать, как автономно, так и параллельно с внешней сетью. Однако, даже при условии обеспечения безопасной работы оборудования, административные и нормативно-технические барьеры интеграции ЛИЭС в сети ЦЭС остаются высокими.

Системные эффекты, соизмеримые с эффектами интеграции ЛИЭС в сети ЦЭС могут быть получены и другими путями, в частности, при создании на базе нескольких

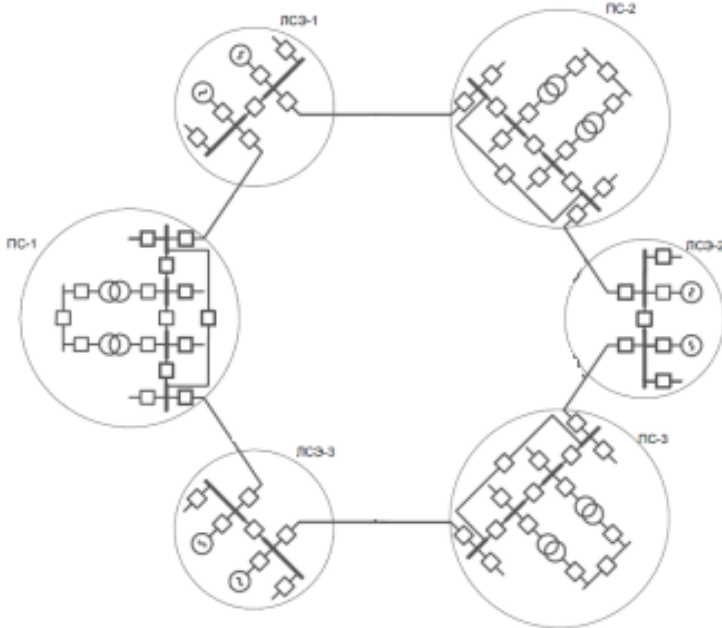


Рисунок 1 - ОЭСММ на базе 3-х ЛИЭС с присоединением к 3-м ПС сети ЦЭС

ЛИЭС ОЭСММ. При этом административных и нормативно-технических барьеров на этом пути практически не существует, а возможности их последующей интеграции с внешней энергосистемой ЦЭС сохраняются.

На рис.1 представлен вариант ОЭСММ с простыми синхронными связями, с тремя точками присоединения к внешней электрической сети и максимальными возможностями для получения системных эффектов от интеграции ЛИЭС, как в ОЭСММ, так и во внешней электрической сети ЦЭС.

Во второй главе рассмотрены различные варианты режимов ЛИЭС и их интеграции между собой и с внешней электрической сетью.

При анализе вариантов интеграции ЛИЭС использовался *индикативный экспертный метод их сравнения*. Экспертам для оценки предлагался набор критериев и показателей, характеризующих системные эффекты для их различных бенефициаров (участников энергетического рынка (физическое или юридическое лицо), получающих определенную выгоду от того или иного варианта интеграции ЛИЭС. К числу таковых отнесены – *потребители энергии, собственники генерации ЛИЭС, собственники распределительной сети ЛИЭС, собственники внешней электрической сети*.

Исследование базировалось на следующих положительных системных эффектах, достигаемых при создании ОЭСММ и определении режимов их работы:

- *Эффект повышения надежности электроснабжения.*
- *Эффект сглаживания графика нагрузки.*
- *Эффект повышения коэффициента использования установленных мощностей (КИУМ) генерирующего оборудования.*
- *Эффект повышения качества ЭЭ по напряжению.*
- *Эффект стабилизации частоты.*
- *Эффект локальной живучести.*

Для корректной и непредвзятой сравнительной оценки вариантов объединения ЛИЭС использовались экспертные мнения различных представителей электроэнергетической отрасли, участвующих в создании и развитии ЛИЭС на территории Сибирского федерального округа РФ: *Разработчики ЛИЭС*, непосредственно осуществляющие исследование при проектировании и применении технических решений, в т.ч. специальных систем управления, обеспечивающих техническую возможность безопасной синхронной работы энергоблоков малой мощности в составе ЛИЭС при параллельной работе с внешней электрической сетью и при их объединении между собой; *Проектировщики*, осуществляющие разработку классических Схем выдачи мощности (СВМ) объектов малой генерации, систем электроснабжения в соответствии с действующими нормативными документами РФ; *Собственники генерирующих установок*, на базе которых осуществляется создание ЛИЭС, осуществляющие эксплуатацию собственного энергетического оборудования и отвечающие за надежность электроснабжения потребителей; *Эксперты по надежности*, как основного комплексного свойства энергосистемы для обеспечения бесперебойного электроснабжения потребителей; *Эксперты внешней электрической сети ЦЭС*, оценивающие соблюдение установленных параметров надежности функционирования ЕЭС России и качества электрической энергии.

Принципиальная схема методики оценки приведена на Рисунке 2.

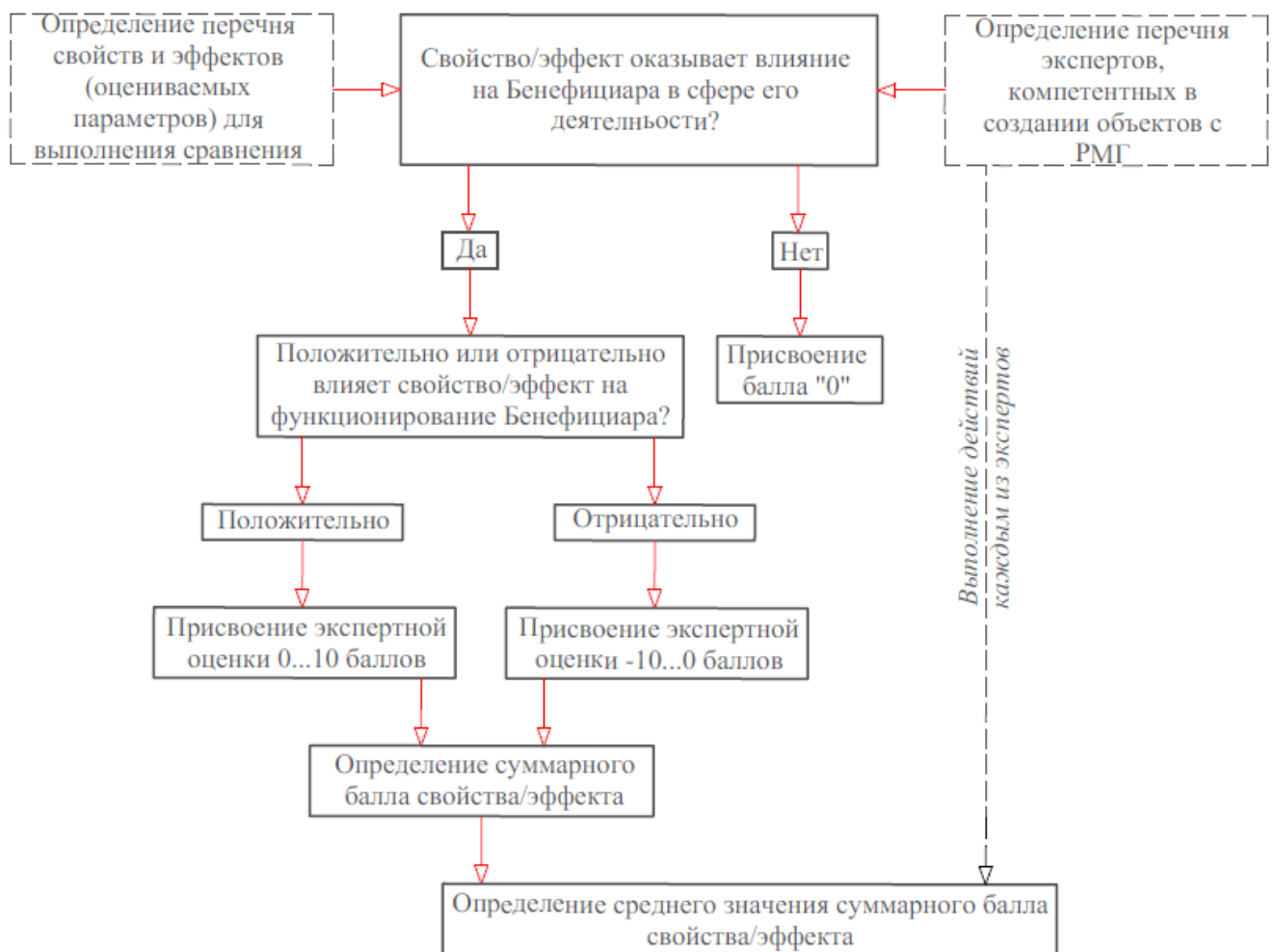


Рисунок 2 - Алгоритм методики сравнительной оценки вариантов объединения ЛИЭС

При анализе технической реализуемости вариантов интеграции учитывался опыт применения современных специализированных способов и цифровых технологий обеспечения безопасности и управления режимами Минигрид при их параллельной работе как в составе ОЭСММ, так и сетях ЦЭС.

Результаты экспертных оценок и их обработки приведены в Таблице 1.

Максимальный средний бал получил вариант «Интегрированная с внешней ЭС ЛИЭС (с правом параллельной работы)», что подтверждается оценками значительного эффекта для всех участников рынка и обуславливает необходимость дальнейших разработок технических решений по развитию ЛИЭС с режимами автономной и параллельной работы с ЦЭС.

Таблица 1 – Сводная таблица значений экспертных оценок свойств и эффектов ЛИЭС и их объединений

Эксперты	Способы интеграции ЛИЭС															
	ЛИЭС с автономной работой				ЛИЭС с автоматическим резервом от внешней сети без права параллельной работы				Интегрированная с внешней ЭС ЛИЭС (с правом параллельной работы)				Энергосистема малой мощности с несколькими ЛИЭС			
	Персонал ЛИЭС	Потребители	Собственники генерации	Собственники внешней сети	Персонал ЛИЭС	Потребители	Собственники генерации	Собственники внешней сети	Персонал ЛИЭС	Потребители	Собственники генерации	Собственники внешней сети	Персонал ЛИЭС	Потребители	Собственники генерации	Собственники внешней сети
Разработчики ЛИЭС	-15	-2	-42	0	-8	6	-46	-20	11	22	35	9	4	27	38	0
Проектировщики	-15	-23	-60	0	-10	-5	-64	-24	12	24	40	9	15	36	52	4
Собственники ЛИЭС	-50	-15	-76	-54	-29	0	-76	-41	33	33	31	26	-22	14	-19	-21
Специалисты по надежности	-35	-15	-70	0	-10	5	-20	-25	30	40	15	-35	10	20	-5	10
Среднее значение	-29	-14	-62	-14	-14	2	-52	-28	22	30	30	2	2	24	17	-2
Итого среднее значение	-118				-92				84				41			

Следующим по количеству баллов является вариант – ОЭСММ. Данный вариант имеет более низкие оценки, в т.ч. в виду отсутствия достаточных научных и технических разработок, опыта эксплуатации данных систем, учета особенностей их работы и т.д., позволяющих делать выводы о свойствах таких уникальных энергообъектов. Для объективной оценки данного варианта требуется детальное исследование каждого из его свойств.

Для оценки согласованности экспертных оценок использовался один из критериев, а именно коэффициент конкордации. При значении коэффициента более 0,7 согласованность считается высокой.

Для определения коэффициента конкордации использовался критерий Р. Спирмена. Результаты расчета приведены в Таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчета для определения согласованности

№	Параметр	Обозначение	Значение
1	Сумма квадратов отклонений суммы оценок	S	54695,4
2	Коэффициент конкордации	W	0,84
3	χ^2 -критерий Пирсона расчетный	$\chi^2_{\text{расч}}$	50,27
4	χ^2 -критерий Пирсона табличный	$\chi^2_{\text{табл}}$	25,00

Значение коэффициента конкордации находится в диапазоне 0,8...1, что соответствует высокой согласованности мнений экспертов, достоверности полученных результатов.

Соотношение $\chi^2_{\text{расч}}$ больше $\chi^2_{\text{табл}}$ говорит о значимости исследуемого коэффициента.

В третьей главе обосновывается применение специализированных способов и предлагаются новые технические решения задач управления режимами ОЭСММ на базе нескольких ЛИЭС. К их числу относятся:

- децентрализованное регулирование частоты и мощности в ОЭСММ при изолированной работе,
- адаптивное первичное регулирование частоты электростанциями ЛИЭС и ОЭСММ для режимов автономной и параллельной работы с ЦЭС,
- восстановление целостности и нормального режима ОЭСММ после ее аварийного или противоаварийного разделения.

При решении задач управления режимами ОЭСММ автор работы придерживался идеологии децентрализованного мультиагентного управления, позволяющего в максимальной степени сохранять независимость входящих в объединение ЛИЭС без снижения достигаемых от объединения системных эффектов.

Управление балансом активной мощности (регулирования частоты) в автономно работающей ОЭСММ

Существующие в системах централизованного энергоснабжения способы решения задачи регулирования частоты и мощности следует отнести к иерархически-централизованным, т.к. требуют сбора и передачи данных из удаленных точек сети, наличия диспетчерского центра.

В работе обосновывается применение и исследуется способ децентрализованного регулирования частоты и мощности, в котором на каждой электростанции устанавливается устройство управления (контроллер), который может осуществлять вторичное регулирование, коррекцию мощности для восстановления резервов вторичного регулирования, а также изменять мощность электростанции после выявления допустимости такого изменения по системным условиям.

$\bar{B}_-, \bar{B}_+, \bar{B}_-$ - частота интервале такта находится в зоне значений ее эффективного поддержания; вне зоны ее эффективного поддержания; ниже зоны значений ее эффективного поддержания; выше зоны значений ее эффективного поддержания.
 A_1^2 - вторичное регулирование осуществляет электростанция первой ЛИЭС, 1-9 такты времени, 10-11 границы коридора допустимого нахождения частоты при эффективном вторичном регулировании.

Адаптивное первичное регулирование частоты электростанциями ОЭСММ при автономной и параллельной работе с системой ЦЭС

Важным для получения системного эффекта по экономичности режимов генерирующего оборудования ЛИЭС и ОЭСММ является предложенный в работе способ стабилизации загрузки генераторов при их параллельной работе с централизованной энергосистемой, который позволяет существенно снизить удельный расход газа. Способ заключается в управлении параметрами характеристик регулирования частоты и мощности, отказа от регулирования обменного перетока мощности в пользу его коррекции при выходе за допустимый коридор. Характеристики регуляторов частоты синхронных генераторов ЛИЭС для различных режимов приведены на рисунке 4.

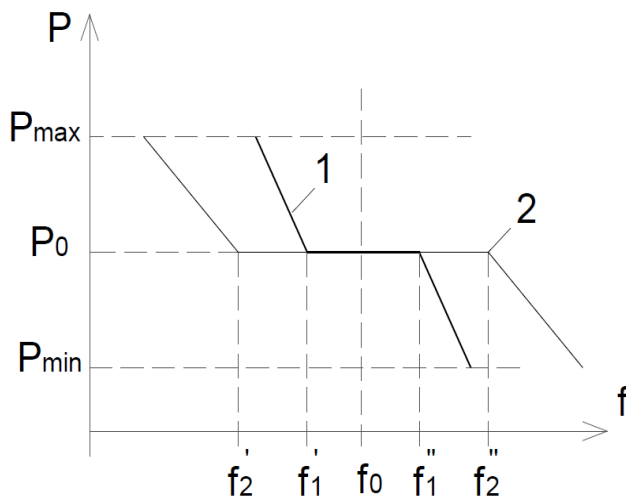


Рисунок 4 - Характеристики регуляторов частоты синхронных генераторов ЛИЭС

На рис. 4: 1-характеристика для режима автономной работы ЛИЭС; 2 – характеристика для режима параллельной работы ЛИЭС с внешней сетью; f – частота вращения энергоблока; f_0 – номинальная частота вращения энергоблока, f_1', f_1'' – границы зоны нечувствительности характеристики регуляторов скорости для автономного режима ЛИЭС; f_2', f_2'' – границы зоны нечувствительности характеристики регуляторов скорости для режима параллельной работы.

Так, при отключении ЛИЭС от внешней электрической сети с переходом в автономный режим уменьшают зону нечувствительности и статизм регуляторов частоты, а после включения ЛСЭ на параллельную работу с внешней электрической сетью коэффициенты статизма и зоны нечувствительности регуляторов частоты генераторов ЛИЭС изменяют на допустимые для режима параллельной работы с максимальной зоной нечувствительности. При этом регулирование обменного перетока заменяется его коррекцией при выходе за допустимые границы, что исключает участие энергоблоков электростанции ЛИЭС в постоянном регулировании обменного перетока мощности и частоты в пределах зоны нечувствительности.

Четвертая глава посвящена исследованию режимных свойств ОЭСММ, определяющих их надежность и экономическую эффективность, выявление особенностей работы ОЭСММ в зависимости от их структурного выполнения и его влияния на системные свойства ОЭСММ.

Интерес представляет влияние объединения ЛИЭС в ОЭСММ на такие свойства и отражающие их характеристики, как:

- Способность сохранять работоспособность при больших нарушениях балансов активной и реактивной мощностей.
- Способность допускать пуски крупных асинхронных двигателей, ограничивающую возможность их использования в режимах изолированной работы.
- Способность обеспечивать динамическую стабильность частоты при нерегулярных колебаниях мощности.
- Способность работать в широком диапазоне изменения суммарной нагрузки.
- Способность обеспечивать перераспределение суммарной нагрузки между электростанциями ЛИЭС, входящими в ОЭСММ.
- Способность сохранять естественную динамическую устойчивость параллельной работы электростанций в ОЭСММ при широкой вариации исходных схемно-режимных условий и возмущений

Для исследования данных свойств были предложены и использованы тестовые схемы одной ЛИЭС и ОЭСММ с двумя и тремя ЛИЭС, представленные на рис. 5. Для схемы 5.а) характерно синфазное групповое движение роторов генераторов в переходных режимах. Для схем 5.б), в) – возникновение взаимных колебаний групп генераторов ЛИЭС, входящих в ОЭСММ.

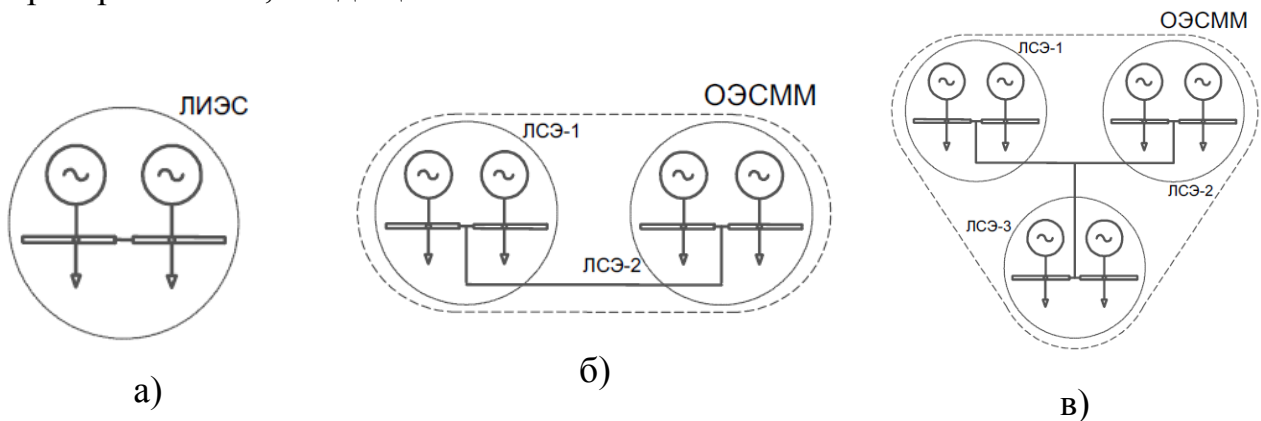


Рисунок 5 - Структурные схемы вариантов ОЭСММ

а) - локальная интеллектуальная энергосистема (вариант 1); б) - ОЭСММ, состоящая из двух ЛИЭС (вариант 2); в) - ОЭСММ, состоящая из трех ЛИЭС (вариант 3)

На рис. 6, 7 приведены характерные переходные процессы, полученные при сбросе мощности и на реальном объекте при цифровом моделировании в программе PowerFactory в тестовой схеме 5а), а в табл. 3 параметры этих процессов. Соответствие динамических свойств обеспечивалось подбором постоянных инерции вращающихся масс энергоблоков и обмотки возбуждения генератора, а также коэффициентов в законах АРС и АРВ.

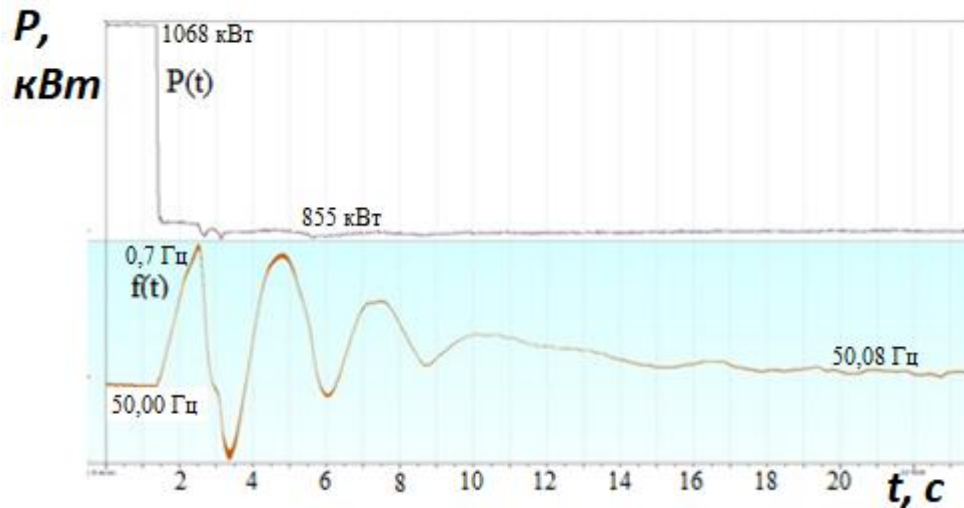


Рисунок 6 - Осциллограмма изменения частоты и мощности энергоблока пилотного проекта ЛИЭС жилмассива «Березовое» (Отключение нагрузки (До возмущения $P=1068$ кВт, $f=49.02$ Гц. После $P=855$ кВт, $f=49.11$ Гц.)

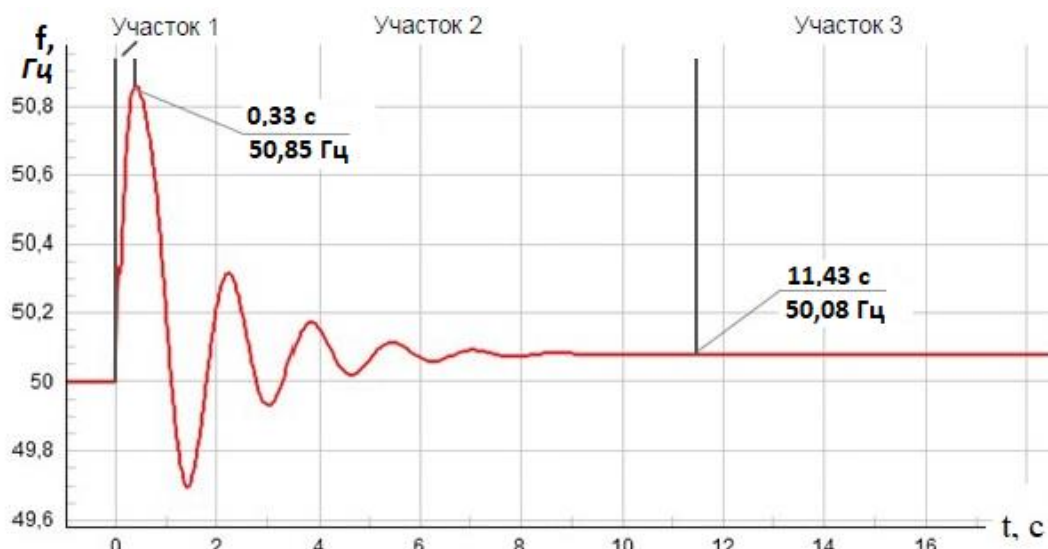


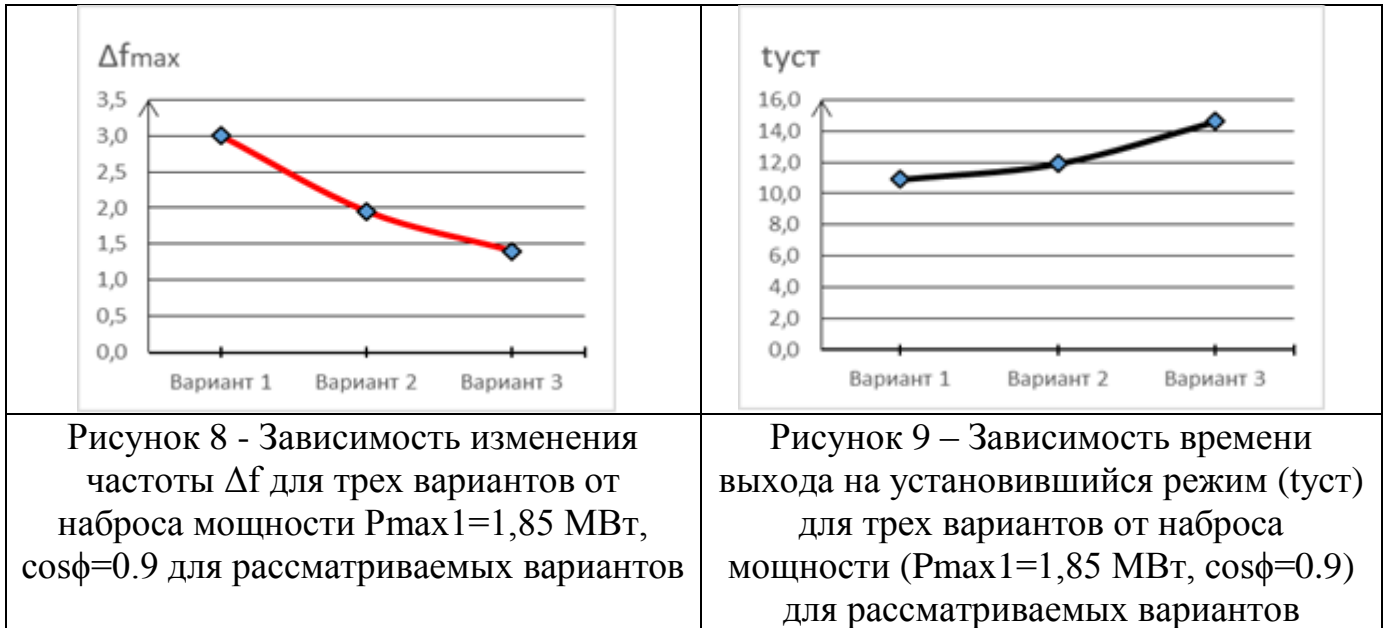
Рисунок 7 – Осциллограмма при цифровом моделировании процесса

Таблица 3 - Таблица согласованности динамических характеристик

Участок осциллограммы на Рисунке 7	Описание	Значения	
		Расчетная модель	Фактические на реальном объекте
1	Время возникновения «клевка частоты»	0,33 с 0,85 Гц	0,6 с 0,7 Гц
2	Количество значимых колебаний в переходном процессе, время затухания	5 11 с	5 10 - 15 с
3	Установившееся отклонение частоты после возмущения	0,08 Гц	0,08 Гц

Ниже представлены результаты исследования, в т.ч. полученные характеристики по всем указанным свойствам.

На рис. 8, 9 представлены зависимости, характеризующие способность ОЭСММ сохранять работоспособность при больших возмущениях балансов активной мощности.



Из представленных зависимостей следует, что укрупнение ОЭСММ за счет увеличения количества входящих в нее ЛИЭС значительно снижает максимальные отклонения частоты, при этом незначительно увеличивает время переходных процессов, т.к. увеличивается количество групп с несинфазным движением роторов генераторов.

На рисунках 10, 11 представлены переходные процессы в ОЭСММ а), с) при успешных пусках АД предельной по устойчивости мощности ($P_{ном\text{двиг}} = 1$ МВт).

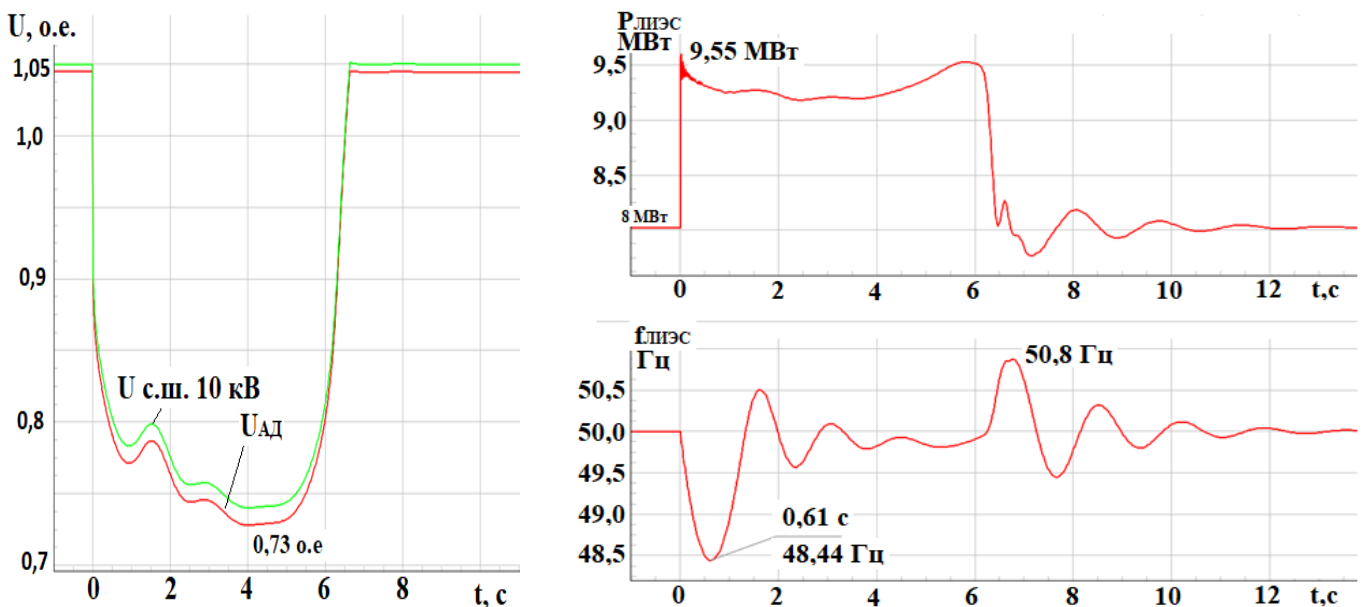


Рисунок 10 - Переходный процесс в ЛИЭС (вариант 1) при пуске мощного асинхронного двигателя, где U_{AD} - модуль напряжения на шинах АД, о.е.; $U_{с.ш.10\text{ кВ}}$ - модуль напряжения на шинах станции; $R_{ЛИЭС}$ - активная мощность ЛИЭС, МВт; $f_{ЛИЭС}$ - Частота в ЛИЭС, Гц

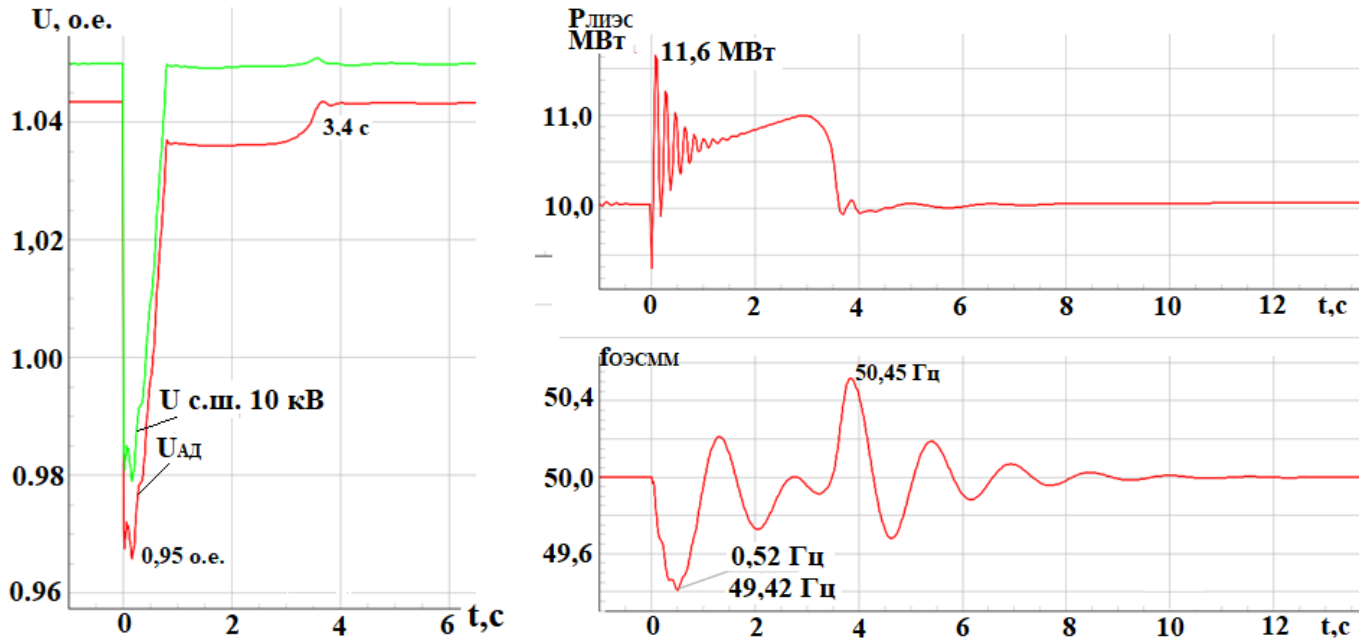


Рисунок 11 - Переходный процесс при пуске мощного асинхронного двигателя в ОЭСММ, состоящей из двух ЛИЭС (вариант 2), где U_{AD} - модуль напряжения на шинах АД, о.е.; $U_{с.ш.10 кВ}$ - модуль напряжения на шинах станции; $P_{ЛИЭС}$ - активная мощность ОЭСММ, к которой подключен АД, МВт; $f_{ОЭСММ}$ - частота в ОЭСММ, Гц

Анализ процессов пуска двигателей в трех вариантах ОЭСММ позволяет сделать выводы о повышении надежности пуска АД по мере увеличения числа ЛИЭС в составе ОЭСММ. Так успешный пуск АД в одиночной ЛИЭС характеризуется максимальным снижением напряжения до критического уровня (0.73 о.н.е.), а время пуска составляет около 6.3 с. В ОЭСММ с двумя и тремя ЛИЭС максимальное снижение происходит до 0.93-0.95 о.н.е., а время пуска сокращается до 3.7- 3.8 с.

Способность обеспечивать динамическую стабильность частоты при нерегулярных колебаниях мощности

На динамическую стабильность частоты в ОЭСММ основное влияние оказывают два фактора:

- Величина нерегулярных колебаний нагрузки,
- Эффективность первичного регулирования частоты регуляторами скорости энергоблоков электростанций ОЭСММ.

Нерегулярные колебания частоты и мощности в больших ЭЭС (мощностью от одного до сотен ГВт) были обстоятельно исследованы в 70-х годах прошлого века, а результаты представлены в работах В.Ф. Тимченко. Они широко используются при проектировании и планировании режимов ЭЭС, разработке систем АРЧМ,

Для энергосистем малой мощности (ЛЭС, ЛИЭС, ОЭСММ) задача априорного определения нерегулярных колебания частоты и мощности стала актуальной в связи с их масштабным развитием, необходимости априорной оценки величины нерегулярных колебаний обменной мощности для режима параллельной работы, учитываемой при настройке регуляторов и уставок автоматики, однако специальные исследования при этом пока не проводились. Сложности их выполнения связаны, в том числе, и огромным разнообразием специфических условий и особенностей режимов таких объектов.

На рис. 12 представлена реальная осциллограмма колебаний частоты в ЛИЭС жилмассива «Березовое» (г. Новосибирск). При параллельной работе колебания частоты в ЛИЭС соответствуют колебаниям частоты в ЕЭС, а все возникающие небалансы компенсируются колебаниями обменного перетока мощности.

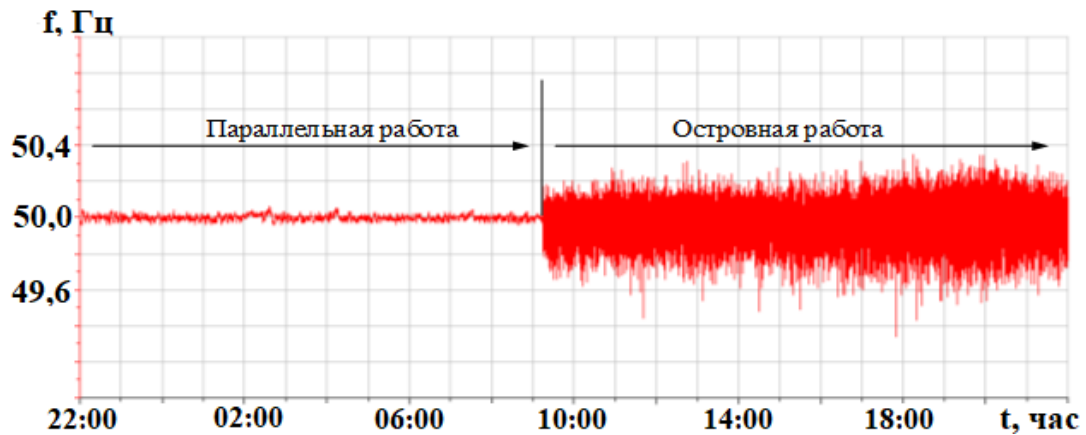


Рисунок 12 – динамические колебания частоты в ЛИЭС в режимах автономной (правая часть осциллограммы) и параллельной работы с ЕЭС

На рисунках 13, 14 представлены профиль суточной нагрузки ЛИЭС и осциллограмма соответствующих ему нерегулярных суточных колебаний частоты для режима автономной работы, позволяющие, как оценить величину нерегулярных колебаний мощности, так и определить ее зависимость от характера и величины нагрузки.

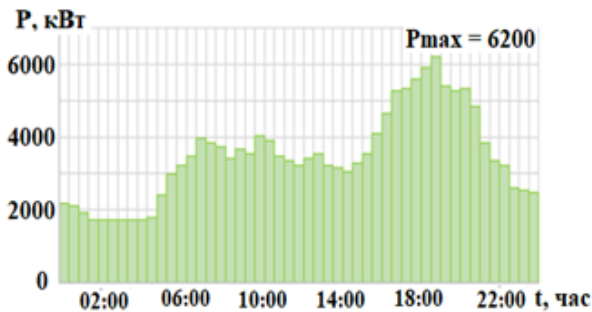


Рисунок 13 - Профиль суточной нагрузки ЛИЭС

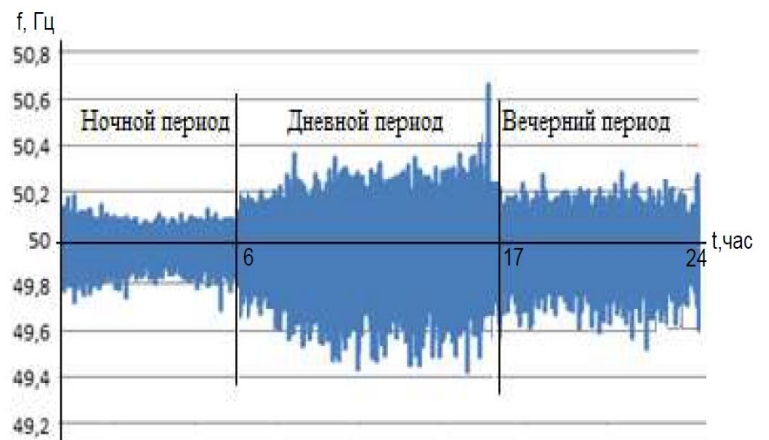


Рисунок 14 - Характерная осциллограмма суточных колебаний частоты для режима автономной работы

Профиль нагрузки позволил выделить в нем три периода с разными структурами потребителей и средними нагрузками (ночной – 1.9 МВт со спокойным коммунальным потреблением энергии, дневной – 3.5 МВт со смешанным коммунальным и производственным потреблением, вечерний – 5.3 МВт с коммунальным активным потреблением), а динамические колебания частоты определить величины нерегулярных колебаний нагрузки путем пересчета колебаний частоты в колебания нагрузки через статизм первичного регулирования с учетом числа работающих энергоблоков мощностью 2 МВт на электростанции (2 в ночной период, 3 в дневной и 4 в вечерний).

Результаты анализа параметров нестационарных режимов ЛИЭС жилмассива «Березовое» приведены в табл. 4.

Таблица 4 - Параметры нестационарного режима ЛИЭС жилмассива «Березовое»

	Р _{нспр} кВт	Р _{нмакс} кВт	Р _{номген} кВт	σ _f Гц	3σ _f Гц	ΔP* о.е.	ΔP кВт	ΔP% проценты
Ночь	1900	2100	2*2000 = 4000	0.04	0.12	0.06	240	11.4
День	3500	4000	3*2000 = 6000	0.094	0.282	0.142	852	21.3
Вечер	5300	6200	4*2000 = 8000	0.067	0.201	0.1	800	12.9

В таблице приняты следующие обозначения: Р_{нспр} - средняя мощность нагрузки периода, Р_{нмакс} - максимальная мощность нагрузки периода, Р_{ном.ген} – суммарная номинальная мощность работающих энергоблоков периода, σ_f - среднеквадратическое отклонение частоты, ΔP - величина нерегулярных колебаний мощности (кВт), ΔP_{проценты} - величина нерегулярных колебаний мощности в процентах от среднеинтервальной мощности.

Обработка осциллограмм суточных колебаний частоты для режима автономной работы (Рис. 12) производилась следующим образом:

- Суточный интервал разбивался на три периода (ночной период 0 – 6 часов, дневной 6 – 17 часов и вечерний 17 – 24 часа)
- Для каждого периода определялась средняя мощность нагрузки - Р_{нспр} и частоты.
- Для каждого периода определялось среднеквадратическое отклонение частоты σ_f от средней, а также интервал 3σ_f, принимаемый за диапазон нерегулярных колебаний частоты.
- Диапазон нерегулярных колебаний мощности определялся через статизм регуляторов скорости двигателей работающих энергоблоков (4%):

$$\Delta P_{3\sigma} = \frac{\Delta f}{K_c}$$

Представленные в таблице результаты позволили сделать следующие выводы:

- Однотипное электропотребление имеет практически постоянные относительные нерегулярные колебания нагрузки (1,3 строки - 11,4% и 12,9% при трехкратном увеличении нагрузки).
- Появление производственной составляющей в нагрузке значительно (кратно) увеличивает нерегулярные колебания нагрузки (21.8% по отношению к 11,4% и 12,9%).
- Рекомендации по оценке нерегулярных колебаний нагрузки, полученные для энергосистем большой мощности, не применимы для энергосистем малой мощности ни по закону зависимости от мощности, ни по их величине, что актуализирует дальнейшие исследования на объектах с МГ по величинам нерегулярных колебаний, их зависимостей от мощностей и характера нагрузки.

Способность сохранять естественную динамическую устойчивость параллельной работы электростанций ОЭСММ при широкой вариации исходных схемно-режимных условий и возмущений

Цель исследования была в оценке влияния факторов, определяющих динамическую устойчивость работы генераторов в ОЭСМ. К числу таких факторов отнесены:

- длительность короткого замыкания,
- разница в сбалансированности ЛИЭС, входящих в ОЭСММ (загруженность внешних связей ЛИЭС обменными перетоками мощности),
- сила электрических связей между ЛИЭС, входящих в ОЭСММ.

Исследования проводились на модели ОЭСММ с тремя ЛИЭС (Рисунок15) при широкой вариации исходных схемно-режимных условий и возмущений. При этом, под естественной динамической устойчивостью подразумевается способность ОЭСММ сохранять нормальный доаварийный режим или переходить в допустимый послеаварийный режим с автономной и/или частичной параллельной работой ЛИЭС после воздействия расчетного возмущения в предположении об отсутствии других подсистем противоаварийного управления, кроме опережающего сбалансированного отделения (ОСД), являющегося основным для каждой из ЛИЭС.

На рисунке 16 представлен процесс с сохранением устойчивости работы при несбалансированности ЛИЭС-1,2 0,2 и 0,8 о.е., где наблюдается снижение напряжения на шинах ЛИЭС-1,2 при КЗ в ЛИЭС-3. Максимальный взаимный угол δ расхождения ЭДС ЛИЭС-1 и ЛИЭС-2 в переходном процессе при этом составляет $10,5^\circ$. ЛИЭС 3 отделяется автоматикой ОСД по условию неизбежности нарушения динамической устойчивости параллельной работы и переходит в послеаварийный режима с дефицитом реактивной мощности, ликвидируемым в дальнейшем режимной автоматикой.

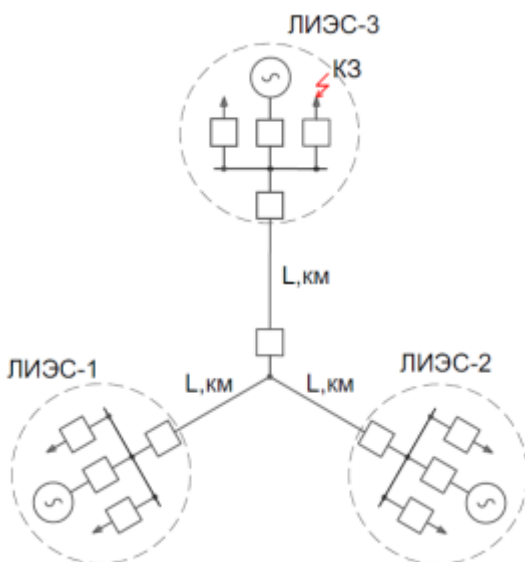


Рисунок 15 – Схема ОЭСММ с тремя ЛИЭС

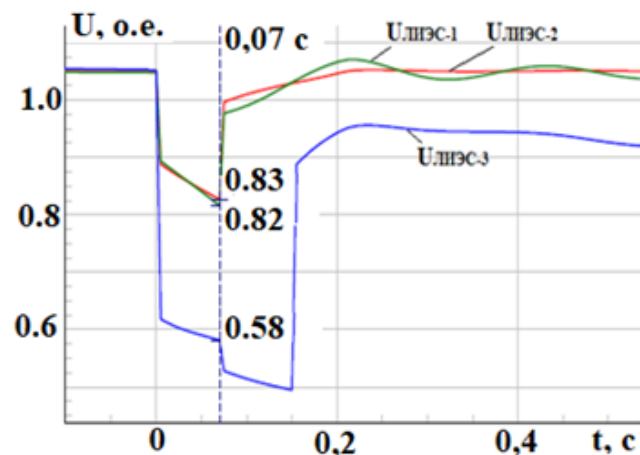


Рисунок 16 - Процесс с частичным разделением ОЭСММ при КЗ (отделение только ЛИЭС- 3)

По результатам многочисленных расчетов с вариацией несбалансированности ЛИЭС сделан вывод о том, что диапазон допустимой исходной несбалансированности ЛИЭС в доаварийном режиме является достаточно широким

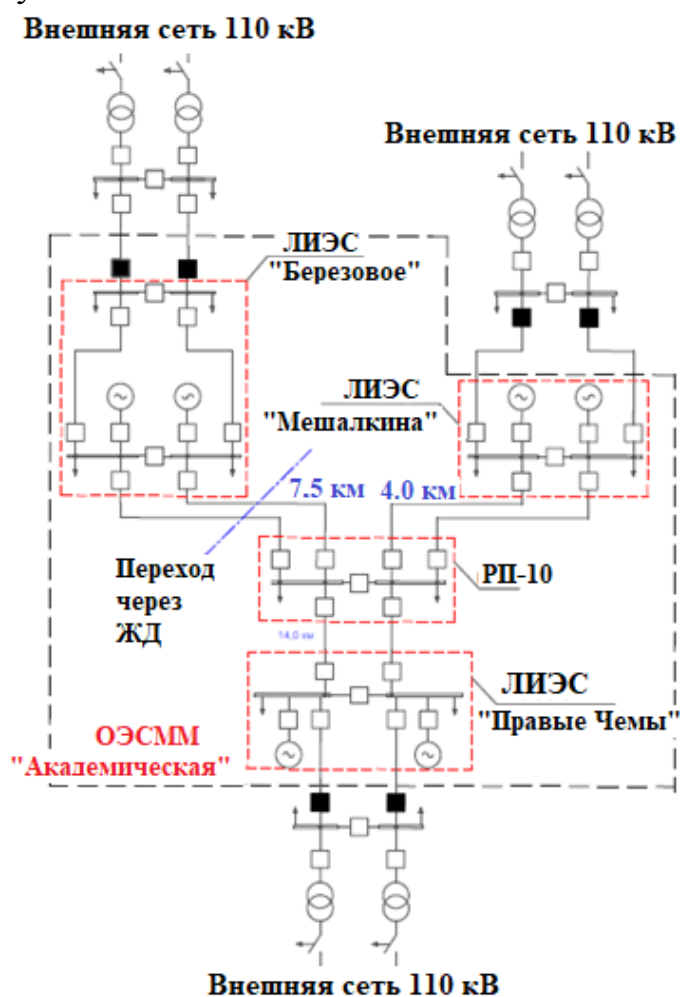
– в рассматриваемой схеме устойчивость сохраняется при локальных несбалансированностях ЛИЭС до 20-80%.

В пятой главе приводится описание объектов, для которых осуществляется проверка целесообразности и технических возможностей создания ОЭСММ, а также выявление особенностей их проектирования.

ОЭСММ Академическая

В качестве характерного объекта исследования рассмотрена предполагаемая к созданию объединенная энергосистема малой мощности (ОЭСММ) Советского района города Новосибирска (название ОЭСММ – «Академическая» в соответствии с географическим расположением), где возможна интеграция уже созданной в рамках пилотного проекта ЛИЭС на базе существующей мини ТЭЦ (электрической мощностью 5х2 МВт) ЛИЭС «Березовое», на базе мини ТЭЦ клиники им. Мешалкина (электрической мощностью 6х2 МВт), а также ЛИЭС на базе мини ТЭЦ (мощностью 5х2 МВт), предполагаемой к созданию в результате реконструкции котельной промышленной площадки «Правые Чемы».

Все электрические станции ОЭСММ «Академическая» расположены на расстоянии до 10 км между собой и могут быть электрически связаны на генераторном напряжении. Рабочая электрическая схема ОЭСММ представлена на Рисунке 17.



Особенностью каждой из ЛИЭС, входящих в ОЭСММ, является их возможность работать на самобалансе, т.е. имеется избыточность генерации по сравнению с собственной нагрузкой ЛИЭС. ОЭСММ имеет возможность осуществлять параллельную работу с внешней электрической сетью (сетью ЕЭС) через подключение к трем подстанциям 110/10 кВ (Силикатная, Шлюзовая, Сеятель).

Расчеты и анализ режимов ОЭСММ при автономной и параллельной с внешней электрической сетью работе, также анализ требований нормативных документов для объектов, подключаемых к сети ЕЭС, опыта реализации пилотного проекта создания ЛИЭС, позволяют обосновать основные технические решения по схеме выдачи мощности и управлению режимами:

Рисунок 17 – Схема основной сети ОЭСММ «Академическая»

1. Использование опережающего сбалансированного отделения (ОСД) ОЭСММ от внешней электрической сети при внешних КЗ и ЛИЭС от ОЭСММ при внутренних.
2. Использование специальной коммутации схемы выдачи мощности для осуществления режимов автономной и параллельной работы ЛИЭС с внешней сетью.
3. Использование распределенного мультиагентного управления ОЭСММ для эффективного управления режимом параллельной работы ОЭСММ с внешней ЭС и при отделении ОЭСММ от внешней сети с переходом к автономной работе.
4. Блокировка несинхронных включений ЛИЭС между собой и ОЭСММ с внешней сетью на параллельную работу по всем возможным сечениям.
5. Автоматическое управление включением на параллельную работу и прекращением параллельной работой ОЭСММ с внешней электрической сетью.
6. Компенсация токов замыкания на землю при объединении электрических сетей 10 кВ ЛИЭС и ПС присоединения или разделение основной сети ОЭСММ трансформаторами для ограничения суммарного тока замыкания на землю.
7. Ближнее резервирование АОСД.
8. Автоматический выбор станции, ведущей частоту в ОЭСММ, в автономном режиме, состава работающего генерирующего оборудования, обеспечивающего выдачу свободных мощностей в сеть и постоянную готовность к спорадическому отделению.
9. Исключение подпитки от ОЭСММ и входящих в нее ЛИЭС отключенных трансформаторов и линий 110 кВ, питающих ПС присоединения 110 кВ.

ОЭСММ изолированных районов Сахалинской области

На изолированной территории области расположен ряд локальных энергорайонов и энергоузлов, обеспечивающих энергоснабжение отдаленных населенных пунктов. Появление устойчивой газовой генерации взамен дизельной, сбалансированность изолированных энергорайонов и возможность применения современных технологических решений создают предпосылки организации ЛИЭС, а их размещение на относительно небольших расстояниях 3-6 км, и наличие существующих (но не эксплуатирующихся) электрических связей между районами позволяет объединить их на генераторном напряжении в эффективную ОЭСММ. Географическая схема предлагаемой ОЭСММ приведена на Рисунке 18.

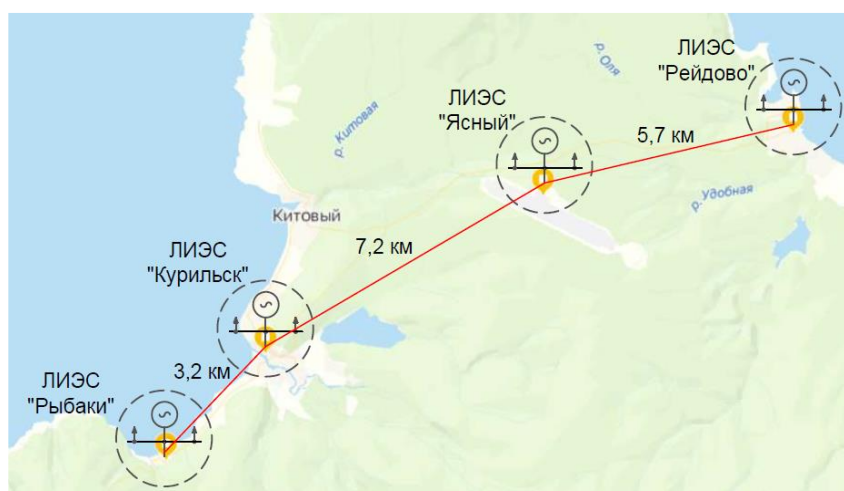


Рисунок 18 – Географическое расположение ЛИЭС

ОЭС на базе района существующей распределительной электрической сети 6-110 кВ

В качестве примера масштабной схемы с предпосылками к созданию ОЭСММ рассмотрена активная сеть энергоснабжения группы предприятий, осуществляющих добычу сырой нефти и нефтяного (попутного) газа.

Энергоснабжение месторождения было обеспечено как созданием РЭС ЦЭС 6/35/110 кВ, так и впоследствии множества относительно небольших газовых электростанций суммарной мощностью 206 МВт при нагрузке около 185 МВт.

Применение идеологии создания ОЭСММ позволило бы значительно сократить объем электросетевого строительства на напряжении 110 кВ и соответствующие капитальные затраты. На (см. Рисунок 19) представлена возможность поэтапного создания ОЭСММ (первого контура, объединяющего ЛИЭС-1 и ЛИЭС-2, позволяющего осуществить надежное электроснабжение нагрузок месторождений, второго - с включением ЛИЭС-3 по мере развития добычи и т.д.).

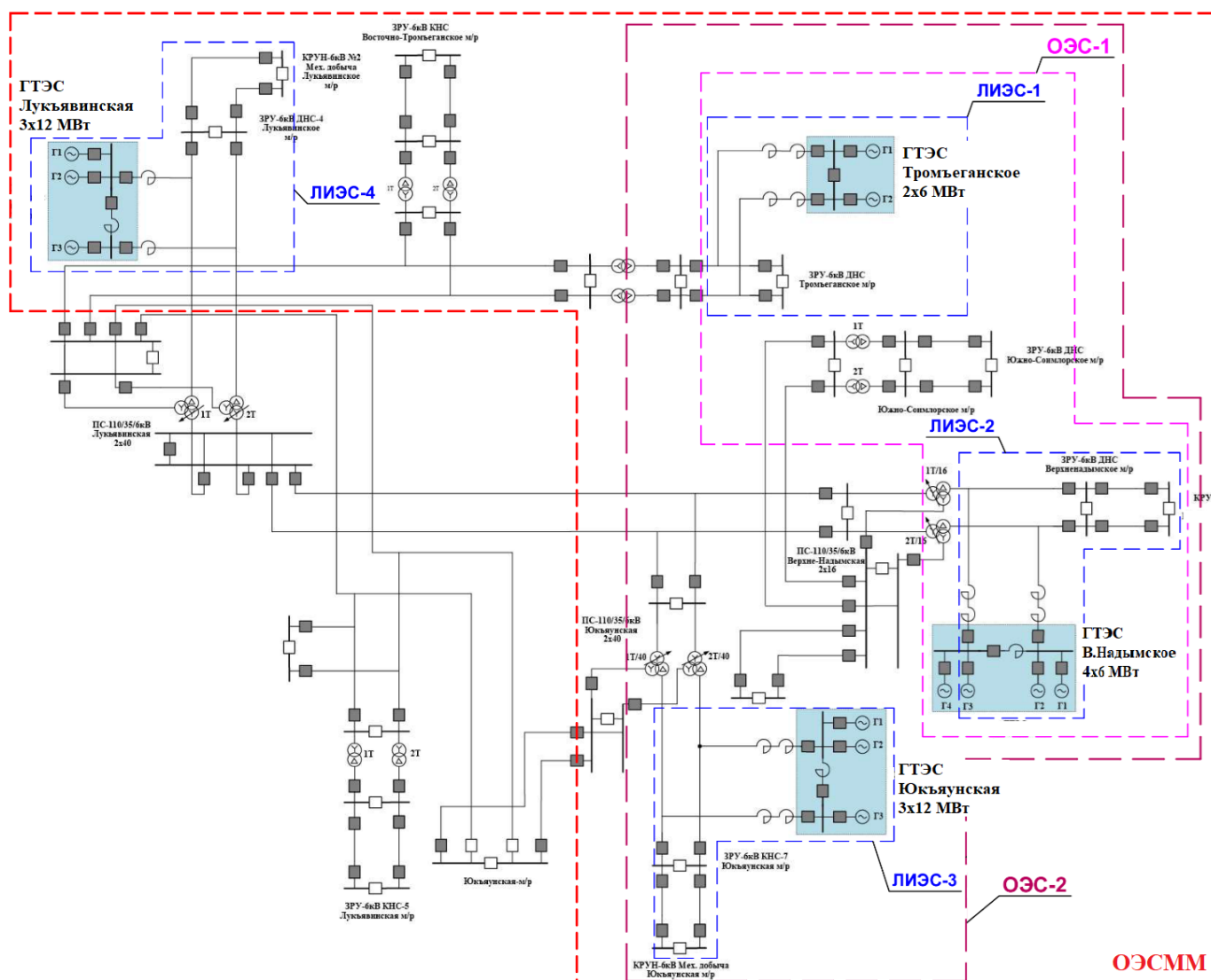


Рисунок 19 – Контуры поэтапного создания крупной ОЭСММ

Таким образом, предложенные новые и будущие технологии позволят создавать не только энергосистемы «малой» мощности, а также энергосистемы мощностью сотни МВт, обладающие необходимой живучестью, независимостью и высокой надежностью.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ:

- Обоснование целесообразности и технологической реализуемости создания ОЭСММ на базе ЛИЭС как альтернативы их интеграции в ЦЭС.
- Методика проведения экспертного индикативного анализа вариантов автономной работы ЛИЭС и их интеграции в сети ЦЭС и в ОЭСММ.
- Способ участия ЛИЭС в ОПРЧ с адаптивными характеристиками.
- Результаты исследования режимных свойств ОЭСММ с их обобщением, позволяющие делать предварительные оценки особенностей режимов проектируемых ОЭСММ.
- Примеры объектов, предрасположенных к созданию ОЭСММ, их характерные особенности.

Основные результаты в комплексе могут быть использованы в качестве прототипа необходимых исследований режимов и технических решений при проектировании ОЭСММ, интеграции ЛИЭС с системами ЦЭС.

Публикации в рецензируемых научных изданиях (ВАК РФ):

1. Режимы и автоматика МИНИГРИД, работающих в составе распределительных электрических сетей ЕЭС. Modes and automation of minigrid operating as part of the ups distribution electric networks / А.Г. Фишов, Е.С. Ивкин, О.В. Гилев, Ю.В. Какоша // Релейная защита и автоматизация. 2021. с. 44-59.

2. Фактор надежности при проектировании распределительной сети = Reliability factor in the design of a distribution network / Ф. Л. Бык, Ю. В. Какоша, Л. С. Мышкина // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики = Power engineering: research, equipment, technology. - 2020. - Т. 22, № 6. - С. 43-54. - DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-6-43-54.

3. Вариативность интеграции синхронной малой генерации в электрические сети Какоша Ю.В., Фишов А.Г. Электроэнергия. Передача и распределение. 2020. № 3 (60). С. 30-37.

Патент на изобретение Российской Федерации:

1. Фишов А.Г., Какоша Ю.В. «Способ управления режимом параллельной работы синхронных генераторов в электрических сетях». Патент №2752248, 23.07.2021 г.

Публикации в других научных изданиях:

1. Варианты и схемы интеграции синхронной малой генерации в электрические сети и локальные энергосистемы/ Какоша Ю.В., Фишов А.Г. В сборнике: Альтернативная и интеллектуальная энергетика Материалы Международной научно-практической конференции. 2018. С. 18-20.

2. Microgrid with alternate current infrastructure [Electronic resource] / I. L. Klavsuts, A. G. Fishov, N. N. Lizalek, Y. V. Kakosha, D. A. Klavsuts // 54 International universities power engineering conference (UPEC) : proc., Romania, Bucharest, 3–6 Sept. 2019. – IEEE, 2019. – 6 p. - DOI: 10.1109/UPEC.2019.8893496.

3. Расчет индексов технического состояния оборудования распределительной сети для определения индикативных показателей надежности электроснабжения / И. А. Сабадаш, Л. С. Мышкина, Ю. В. Какоша //

Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр. : в 9 ч., Новосибирск, 2–6 дек. 2019 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2019. – Ч. 4. – С. 79–83.

4. Расчет индикативных показателей при управлении развитием сетей / И. А. Сабадаш, Л. С. Мышкина, Ю. В. Какоша // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. : в 9 ч., Новосибирск, 30 нояб.–4дек. 2020 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2020. – Ч. 4. – С. 64–68.

5. Distributed power generation and power supply reliability improvement [Electronic resource] / F. L. Byk, Y. V. Kakosha, L. S. Myshkina // E3S Web of Conferences. - 2020. - Vol. 216 : Methodological problems in reliability study of large energy systems (RSES 2020) : Rudenko intern. conf., Kazan, 21-26 Sept. 2020. - Art. 01013 (5 p.). - Mode of access: DOI: 10.1051/e3sconf/202021601013

6. Regulation of voltage and reactive power in AC microgrid / A. G. Fishov, Y. V. Kakosha, I. L. Klavsuts, D. A. Klavsuts. – DOI 10.1109/MPS52805.2021.9492706. – Text : electronic // 9 International Conference on Modern Power Systems (MPS–2021) : proc., Romania, Cluj-Napoca, 16–17 June 2021. – Art.9492706 (6 p.). – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9492706>.

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 № 3497. Подписано в печать 11.06.2024 г.