

Проект: «Разработка передовых технологий для развития распределённой энергетики»

ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы"

Проект № 05.604.21.0243

Уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта): RFMEFI60419X0243

Начало работ: 04.12.2019

Окончание работ: 30.11.2020

РЕЗЮМЕ ПРОЕКТА

Ключевые слова: распределенная энергетика, локальная генерация, возобновляемые источники энергии, солнце, ветер, фотоэлектрический преобразователь, ветрогенератор, углеводородное топливо, электрохимический топливный элемент, хранение энергии, электрохимическая аккумуляторная батарея, электролизёр, водород, постоянный ток, сетевая структура, надёжность, отказоустойчивость

Основные задачи, решаемые в рамках прикладных научных исследований:

1. Разработка новых структурных решений и передовых технологий для развития распределённых энергетических систем различного масштаба мощности, например, от индивидуального жилого дома до потребителей промышленно-бытового назначения малого и среднего бизнеса.

2. Создание системного компьютерного инструментария, позволяющего методами вычислительных экспериментов оценивать эффективность и надёжность разработанных новых структурных решений для таких распределённых энергосистем в широком диапазоне потребляемых и генерируемых мощностей.

3. Разработка на основе новых структурных решений Эскизного проекта отказоустойчивой распределённой энергетической системы на постоянном токе.

Этап 2. Полученные в 2020 году результаты

В ходе выполнения проекта «Разработка передовых технологий для развития распределённой энергетики» по Соглашению о предоставлении субсидии № 075-15-2019-1847 (05.604.21.0243) от 4 декабря 2019 г. (уникальный идентификатор работ (проекта) **RFMEFI60419X0243**) с Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы» на этапе № 2 «Теоретические и экспериментальные исследования в области развития распределённой энергетики. Обобщение и оценка результатов исследований» были выполнены следующие работы:

За счет средств субсидий:

- Разработан математический аппарат для расчета распределённых энергетических систем и прогноза их эксплуатационных характеристик:
 - Разработаны математические модели согласно п. 4.1.2, 4.2.4 и 4.2.5 ТЗ.
 - Разработаны компьютерные программы для динамического математического моделирования согласно п.2.2 ТЗ.

- Проведены вычислительные эксперименты для оптимизации параметров распределенной энергетической системы.
- Разработана эскизная конструкторская документация в соответствии с ГОСТ 2.125-2008 на экспериментальную модель распределенной энергетической системы согласно п.4.3 ТЗ.
- Осуществлены изготовление, сборка и наладка экспериментальной модели распределенной энергетической системы согласно п.4.3 ТЗ.
- Проведена валидация расчетных кодов – проверка полученных результатов динамического математического моделирования путем сравнения с экспериментальными данными, полученными на экспериментальной модели распределенной энергетической системы.
- Разработана методика масштабирования результатов проекта для последующего использования в более крупных электроэнергетических системах с целью обоснования дальнейших технических проектных решений.
- Разработан Эскизный проект распределенной энергетической системы общей генерирующей мощностью до 10 МВт для объектов в Северо-Западном регионе России согласно п.6.1.3.7 ТЗ.
- Разработан с использованием результатов ПНИ проект ТЗ на ОКР на системы генерации и накопления электроэнергии для распределенных энергетических систем.
- Проведены обобщение и оценка полноты решения задач ПНИ, в том числе:
 - сопоставлены анализ научно-информационных источников и результаты теоретических и экспериментальных исследований;
 - проведена технико-экономическая оценка рыночного потенциала полученных результатов;
 - проведен анализ выполнения требований технического задания на ПНИ;
 - проведена оценка полноты решения задач и достижения поставленных целей ПНИ.

За счет средств Индустриального партнера:

- Разработаны программа и методики экспериментальных исследований на экспериментальной модели распределенной энергетической системы.
- Проведены экспериментальные исследования на экспериментальной модели распределенной энергетической системы.
- Проведены дополнительные патентные исследования в соответствии с ГОСТ Р 15.011-96.
- Разработаны предложения и рекомендации по реализации (коммерциализации) результатов проекта, вовлечению их в хозяйственный оборот.

Все задачи этапа № 2 проекта выполнены в полном объеме и в соответствии с Планом-графиком исполнения обязательств, Техническим заданием Соглашения № 075-15-2019-1847 от 4 декабря 2019 г. о предоставлении из федерального бюджета грантов в форме субсидий в соответствии с пунктом 4 статьи 78.1 Бюджетного кодекса Российской Федерации, Дополнительным соглашением № 075-15-2019-1847/1 от 31 января 2020 г., Дополнительным соглашением № 075-15-2019-1847/2 от 22 июля 2020 г., Дополнительным соглашением № 075-15-2019-1847/3 от 17 сентября 2020 г. и Дополнительным соглашением № 075-15-2019-1847/4 от 26 ноября 2020 г.

Разработки распределённых сетей на постоянном токе в России находятся в настоящее время на уровне обсуждения концепций.

В рамках проделанной в 2020 году работы разработаны для внедрения новые структурные решения их построения и ключевые технологии - силовые конверторы преобразования постоянного тока для получения напряжений необходимых уровней, необходимых для их функционирования.

Разработан Эскизный проект распределённой энергосистемы для различных масштабов применения, например, для индивидуального загородного жилого дома, улицы / квартала в посёлке,

отдельного сельского поселения, состоящего из нескольких посёлков, относительно крупного сельского региона (см. рисунок 1), состоящего из нескольких таких поселений. На рисунке 2 в качестве примера приведена схема распределённой энергосистемы на постоянном токе для небольшого посёлка.

На рисунках 3, 4, 5 и 6 показаны более сложные структуры энергосистем из указанного выше Эскизного проекта, обладающие высокой живучестью / отказоустойчивостью к внешним экстремальным воздействиям и авариям.

Предложенные в Эскизном проекте структуры и решения могут быть адаптированы для применения и в новых жилых комплексах, для различных объектов промышленно-бытового назначения, и позволяют разрабатывать новые распределенные энергетические системы различного масштаба как на постоянном токе, так и интегрировать их в энергетические системы на переменном токе.

Разработан необходимый компьютерный инструментарий, позволяющий методами вычислительных экспериментов оценивать эффективность новых аппаратных и программных решений для распределенной энергосистемы в широком диапазоне потребляемых и генерируемых мощностей.

С использованием признанных на мировом уровне и доступных программных платформ и языков, таких как MATLAB Simulink, Python, Delphi, Arduino Integrated Development Environment, Function Block Diagram, C++ и Arbore Analyste разработаны необходимые компьютерные программы, которые в свою очередь использовались при проведении вычислительных экспериментов на имитационных компьютерных моделях. В частности, разработаны программы для изучения поведения узлов и фрагментов распределенных энергосетей, испытаний различных сценариев и режимов работы, построения управляющих воздействий, поиска оптимальных характеристик и определения перечня команд для органов управления ключевых элементов системы.

Согласно разработанной Программы–методике были проведены необходимые натурные эксперименты, в ходе которых, в частности, были отлажены специально разработанные DC/DC конвертеры для преобразования постоянного тока 48 – 220 В и зарядные устройства для аккумуляторов с напряжением 48 В и 220 В. Эти оригинальные DC/DC конвертеры разрабатывались с учетом их применения в сетях постоянного тока в качестве не только преобразователей напряжения, но и как главный элемент автоматического поддержания основных параметров распределенной сети.

С использованием полученных экспериментальных данных была выполнена валидация расчётных кодов, а затем и разработана методика масштабирования для последующего использования в более сложных структурах распределённых энергосистем, примеры которых, взятые из Эскизного проекта показаны ниже на рисунках 3, 4, 5, 6, 7.

Разработанный Эскизный проект распределённой энергосистемы даёт основу новому оригинальному подходу к техническому проектированию распределённых систем известных как Smart Power Grids применительно к российским условиям применения, возможностям их отечественной комплектации и последующей эксплуатации.

Традиционно подобные сети управляются с помощью диспетчерских служб, следящих за напряжением в разных сегментах сети и регулирующих направление энергопотоков с помощью коммутационной аппаратуры. Применение постоянного тока позволяет упростить процедуры управления. В сетях постоянного тока не требуется контроль частоты и фазы вырабатываемого тока. Соответственно, отпала необходимость централизованного контроля параметров всех генераторов и накопителей.

Для компьютерного моделирования распределённых энергетических сетей была применена оригинальная технология параллельных вычислений. При этом моделирование проводилось путем распараллеливания расчетов при разных сценариях работы энергосетей. Параллельная симуляция

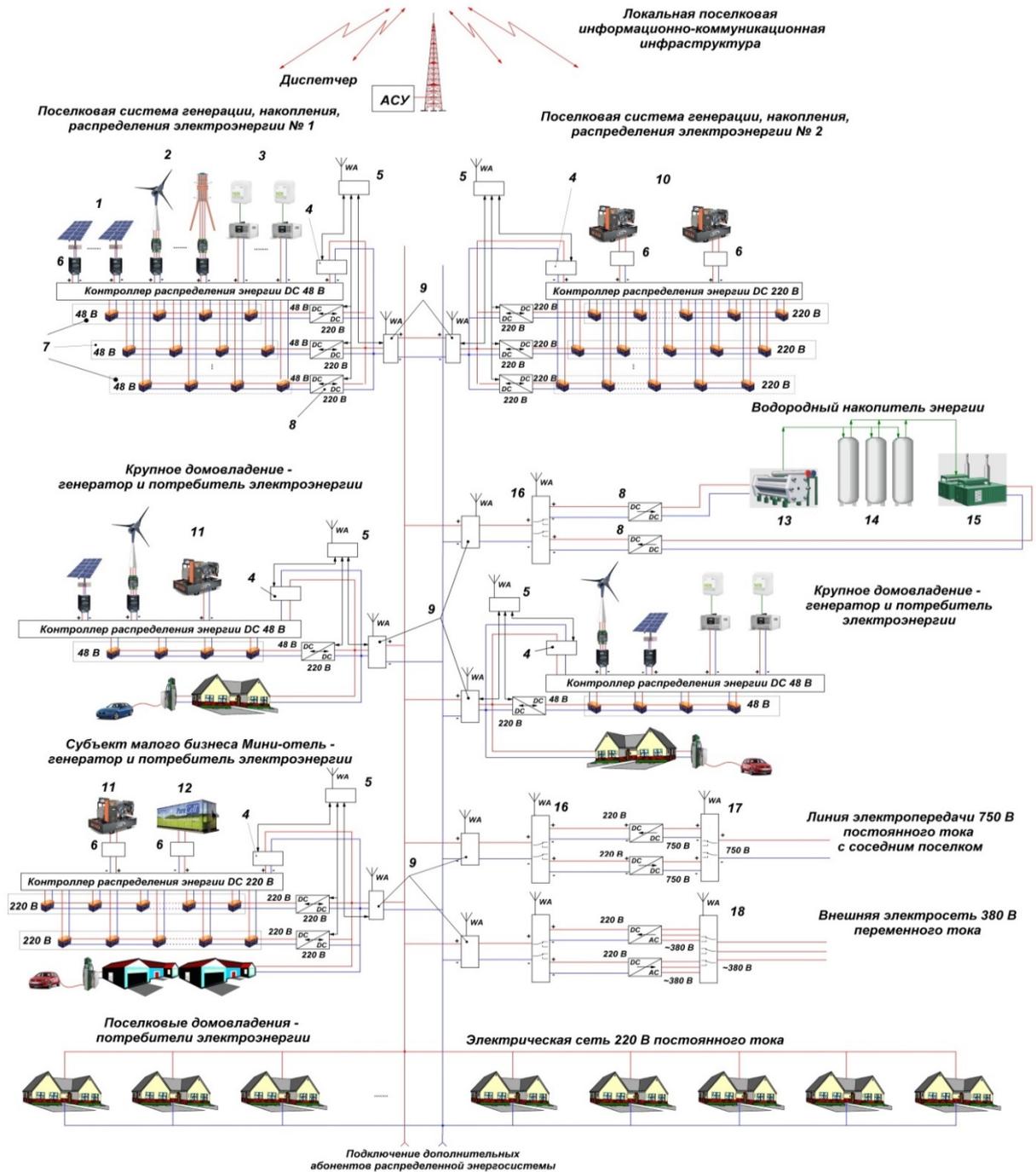
расчётных сценариев была многократно запущена на вычислительном кластере под управлением MATLAB Parallel Server с различным количеством параллельно работающих расчетных ядер MATLAB, работающий на операционных системах Windows, Linux и Mac OS.



Рисунок 1 - Жилые посёлки и другие промышленно-бытовые объекты, рассматриваемые в рамках проводимых прикладных научных исследований

Проведённые вычислительные эксперименты показали, что распараллеливание модели на вычислительном кластере в нашем случае многократно ускоряет расчет всех сценариев по сравнению с обычным однопоточным расчетом.

Для проведения сравнительного анализа надежности и отказоустойчивости различных структурных схем распределенных энергетических сетей разработана компьютерные программы аналитического сравнительного анализа надежности ряда простых схем для соединения участников распределенной сети, а также программа имитационного компьютерного моделирования с целью сравнительного анализа надежности и отказоустойчивости более сложных схем соединения узлов и кластеров, включая анализ допустимого количества отказов линий, не приводящих к отключению участника от распределенной энергетической сети. Результат имитационного моделирования отказов линий для различных топологий представлен на рис. 8.



1 – солнечная батарея; 2 – ветроэнергетическая установка; 3 – метанольный топливный элемент; 4 – зарядное устройство от сети 220 В постоянного тока; 5 – управляющий контроллер; 6 – зарядный контроллер; 7 – аккумуляторная батарея; 8 – преобразователь постоянного тока; 9 – двунаправленный счетчик электроэнергии; 10 – мотор-генератор 220 В; 11 – мотор-генератор 48 В; 12 – топливный элемент на природном газе; 13 – электролизер; 14 – емкости с водородом; 15 – топливные элементы; 16 – контроллер-коммутатор DC 220 В; 17 - контроллер-коммутатор DC 750 В; 18 - контроллер-коммутатор AC 380 В.

Рисунок 2 – Фрагмент отдельной энерголинии на постоянном токе для жилого квартала / сельского посёлка

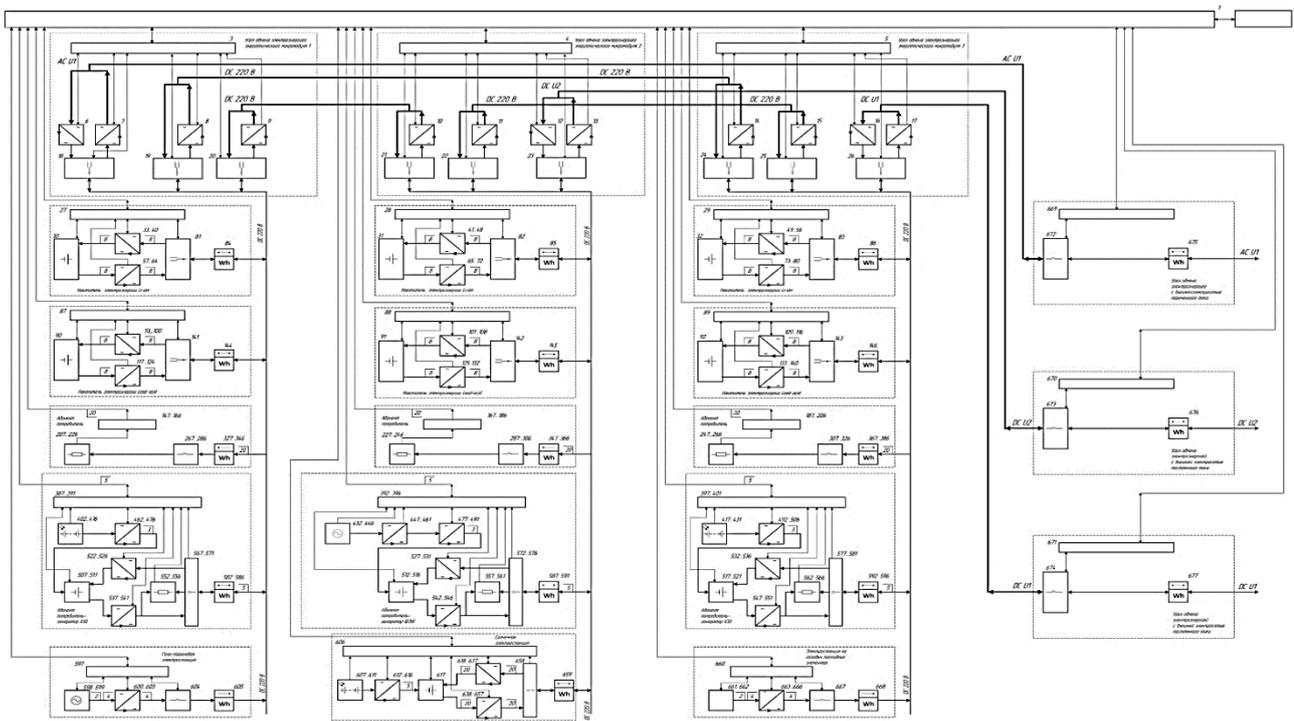
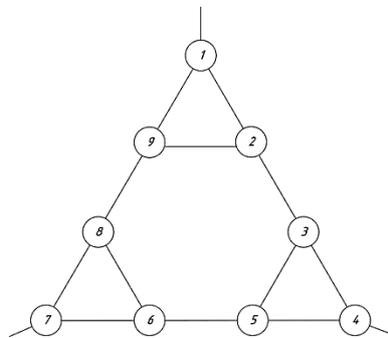
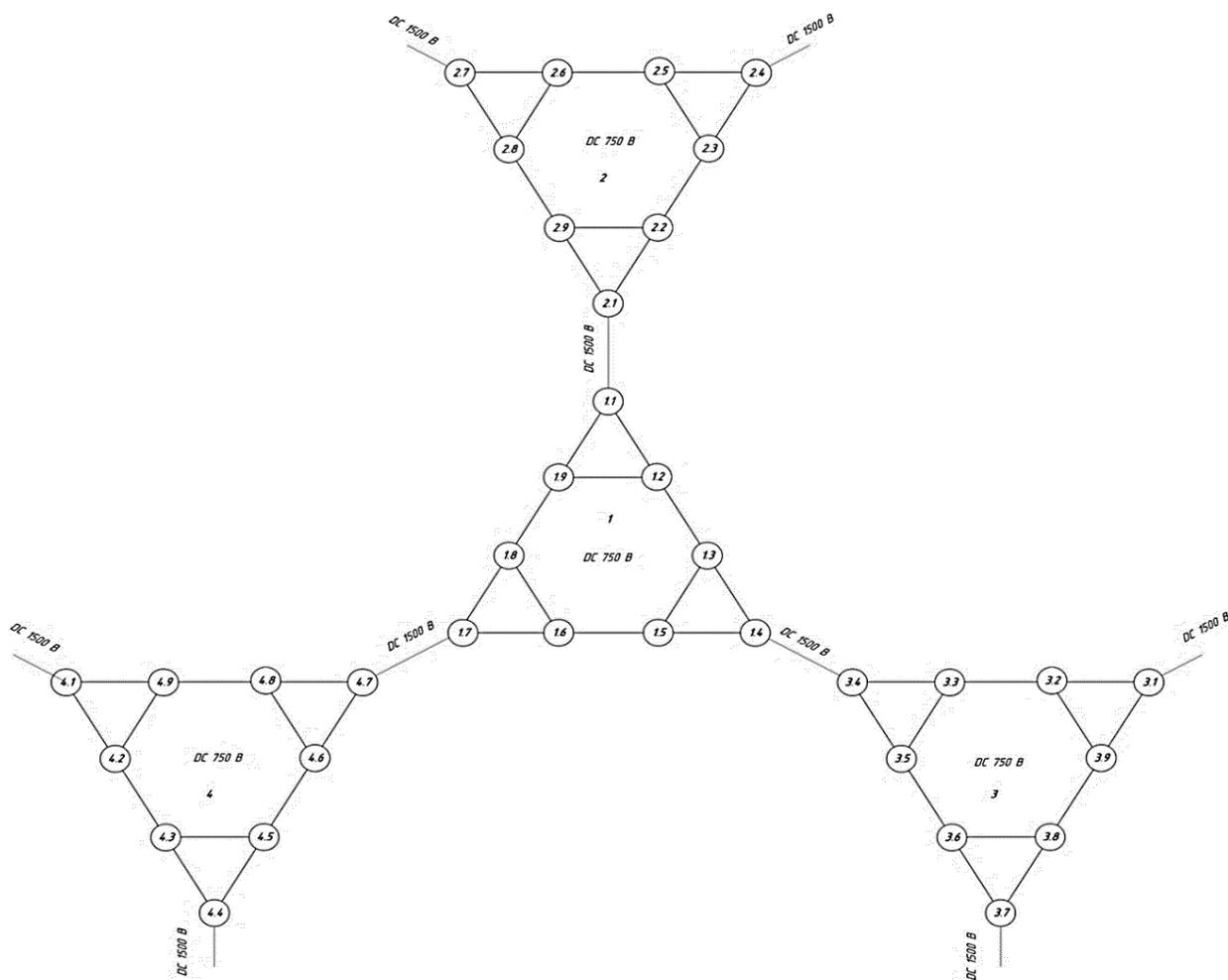


Рисунок 3 - Энергоузел отдельного посёлка, состоящий из трёх энерголиний на постоянном токе, обменивающихся друг с другом электроэнергией, и имеющий доступ к другим энергоузлам внешней распределённой энергосистемы



1 – 9 – энергетические узлы, представленные выше на рис.3

Рисунок 4 - Распределенная энергетическая система из девяти энергоузлов на постоянном токе. Отказоустойчивая структура с троированными связями каждого из узлов друг с другом и последовательной топологией, имеющая связи с другими внешними энергосистемами.



*1 – 4 – энергетический кластер из девяти энергоузлов – поселков с троированными связями;
 1.1 – 4.9 - энергетическая система поселка (энергоузел), состоящая из трех энергетических
 линий (энергетических микромодулей)*

Рисунок 5 - Фрагмент распределенной энергетической системы из четырёх отказоустойчивых энергетических кластеров, каждый из которых состоит из девяти энергоузлов с троированными связями.

Полученные результаты могут быть использованы как для планирования топологии распределённой сети, так и для определения оптимальных стратегий ремонта.

Сегодня можно назвать по крайней мере три сопоставимых по широте и глубине рассмотрения данной тематики концепции построения распределённых Smart Grid систем.

Во-первых, это «Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью», Редакция 5.0, 2012 г. разработанная научными коллективами ОАО «НТЦ электроэнергетики», ОИВТ РАН, ГУ ИЭС, ЗАО «Континуум», ИНЭИ РАН, ИСЭМ СО РАН, ОАО «НИИПТ», ОАО «Институт «Энергосетьпроект», ВШЭ, ИПУ РАН, НИУ МЭИ.

Во-вторых, это широко известная европейская концепция Smart Power Grids (см. подробнее, например, European Commission. Smart Grids: Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future. ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/fp7/energy/docs/smartgrids_en.pdf).

В-третьих, это более детальный подход Министерства энергетики США (Smart Grid System Report, U.S. DoE, <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2009%20Smart%20Grid%20System%20Report.pdf>).

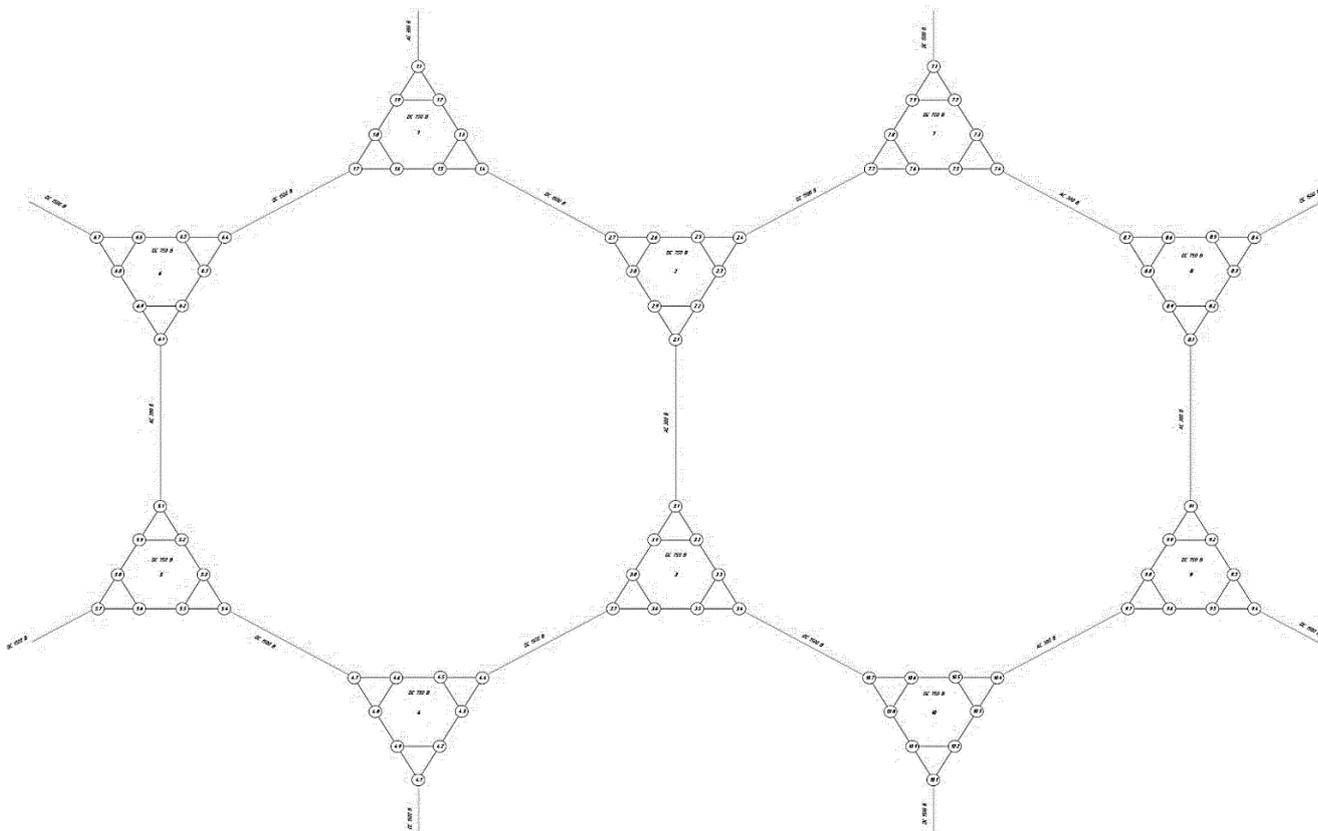


Рисунок 6 - Сотовая отказоустойчивая структура, фрагмент распределенной энергетической системы с расположением десяти энергетических кластеров с троированными связями с соседними кластерами, каждый из которых состоит из девяти энергоузлов.

Полученные результаты позволяют утверждать, что приведённые в Проекте научно-технические решения в достаточно определённой мере соответствуют всем трём указанным выше концептуальным подходам мирового уровня.

По результатам исследований 2020 года поданы заявки на получение следующих охранных документов:

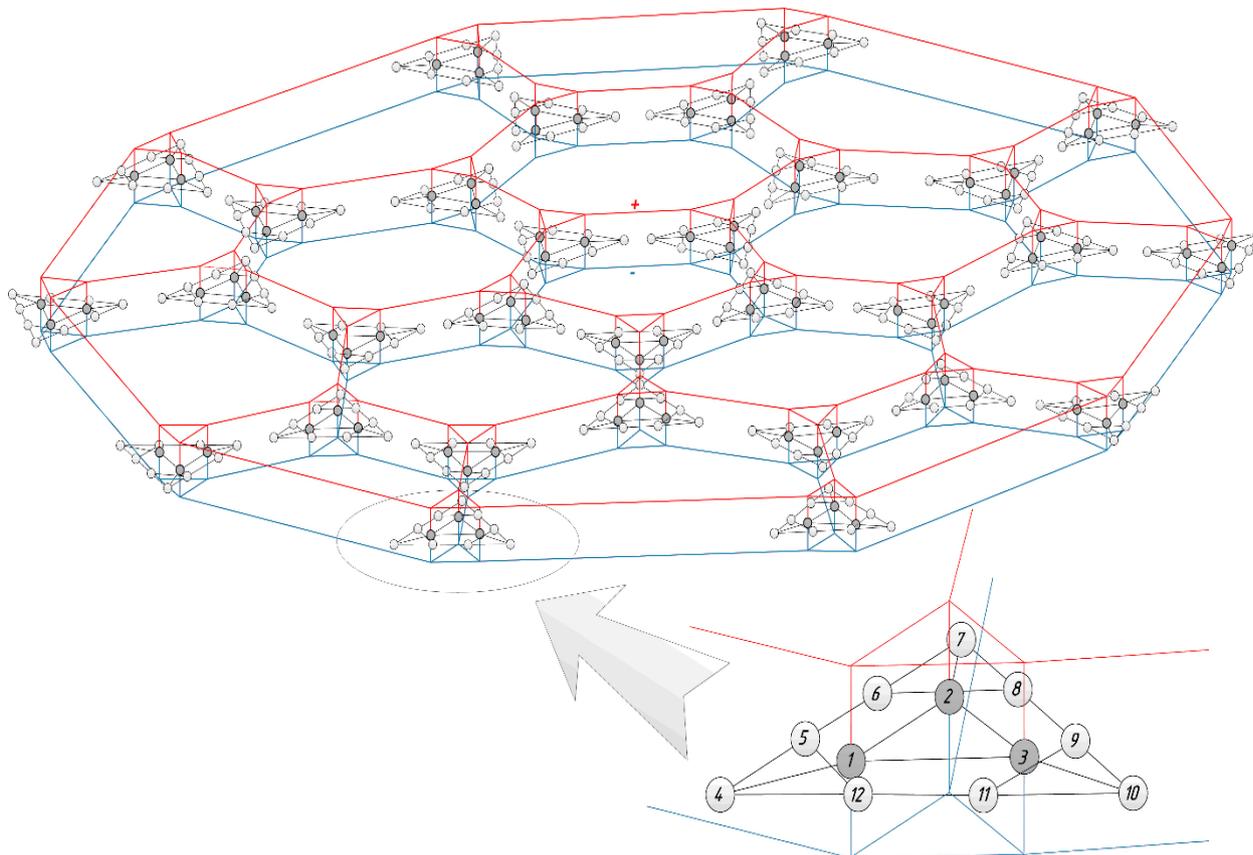
- Изобретение, заявка № 2020125515 от 31.07.2020 г. «Автономный источник электроснабжения на основе ветросиловой установки», РФ.
- Изобретение, заявка № 2020131285 от 23.09.2020 г. «Распределенная энергетическая сеть», РФ.
- Изобретение, заявка № 2020134593 от 21.10.2020 г. «Способ распределения и передачи электроэнергии для удаленных нагрузок и система его осуществления», РФ.

Развитие проекта и дальнейшая разработка выбранных направлений исследований может иметь следующие позитивные эффекты, такие как:

- снижение потерь в электрических сетях постоянного тока при передаче электроэнергии на расстояние;
- повышение надежности объектов генерации и объектов электропотребления;
- снижение затрат на эксплуатацию и ремонт для отказоустойчивых распределённых электросетей по сравнению с традиционными;

- обеспечение взаимодействия электроэнергетической сети с объектами генерации и потребления на основе более эффективного использования электроэнергии за счет ситуационного регулирования потоков электроэнергии;

- дальнейшая разработка автономных региональных энергосистем, с помощью ВИЭ и малой АЭ самостоятельно обеспечивающих собственные потребности в электроэнергии с минимальным использованием «внешних» привозных углеводородных энергоресурсов.



1-3 – «транзитные» энергоузлы (например, крупные жилые поселки), имеющие прямое соединение с региональной (межпоселковой) высоковольтной электросетью постоянного тока и способные обмениваться с ней электроэнергией;

4-12 – локальные энергоузлы (например, небольшие жилые посёлки), обменивающиеся электроэнергией друг с другом по постоянному току 220 В, но не имеющие прямого соединения с региональной (межпоселковой) электросетью и способные обмениваться с ней электроэнергией через «транзитные» энергоузлы.

Рисунок 7 – Многокластерная распределенная энергетическая система с расположением энергетических кластеров из двенадцати энергоузлов в узлах структуры. Параллельно-последовательная сотовая отказоустойчивая топология.

Двухпроводная схема - на постоянном токе

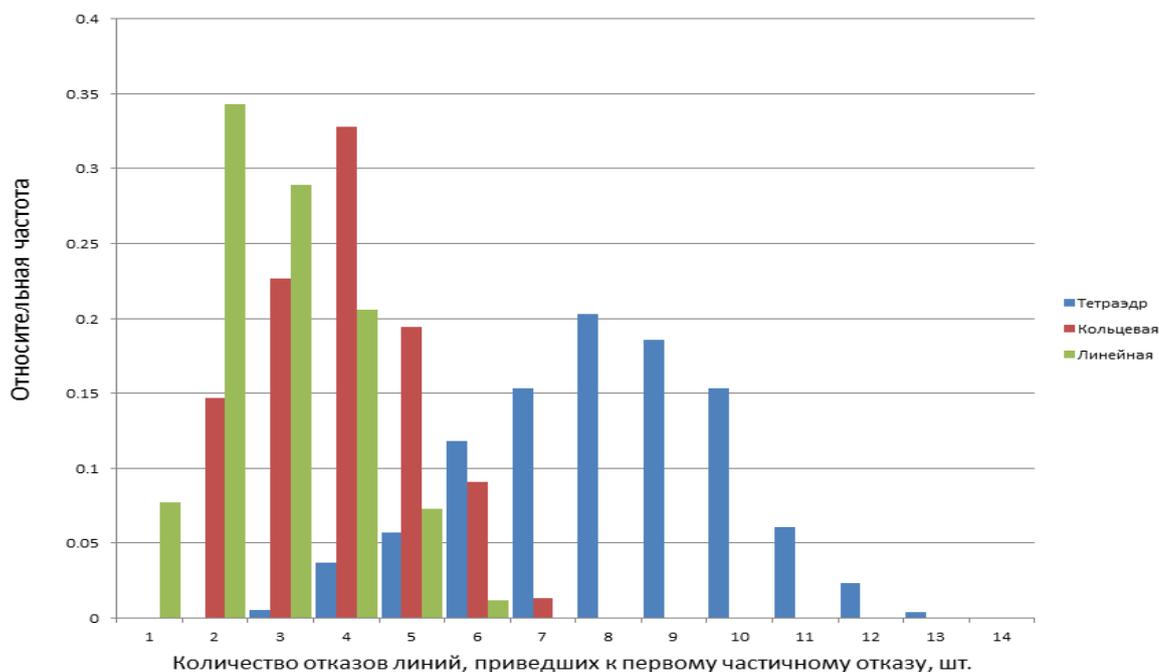


Рисунок 8. Относительная частота возникновения частичного отказа РЭС для разных количеств отказавших линий.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и дальнейшей эксплуатации отечественных Smart Power Grids. Переход на постоянный ток в таких Smart Power Grids позволит по предварительным оценкам снизить затраты на электроэнергию по сравнению с аналогичными по параметрам традиционными энергосистемами на переменном токе.

Разработанный в данной работе Эскизный проект распределенной системы даст возможность в дальнейшем реально электрифицировать конкретные объекты в удалённых регионах России. Использование в местных Smart Power Grids возобновляемых источников энергии позволит снизить отрицательное экологическое воздействие на окружающую среду. Местные транспортные средства можно будет частично или же полностью перевести на электротягу. Для покрытия дефицита энергии от ВИЭ в период полярной ночи будут использоваться низкоэмиссионные электрохимические топливные элементы на природном газе, заменяющие там, где это возможно, традиционные двигатели внутреннего сгорания.

Всё вышесказанное реально осуществимо уже сейчас и должно стать основой для дальнейших разработок.

Предлагаемые в проекте распределенные отказоустойчивые энергосистемы на постоянном токе - новая перспективная область развития региональной энергетики с использованием ВИЭ.