

## КАЧЕСТВО И НАДЕЖНОСТЬ ЭНЕРГОСИСТЕМ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Т. В. Бойкова<sup>1</sup>, А. С. Григорьев<sup>2</sup>, Д. В. Маколкин<sup>3</sup>, С. А. Королев<sup>4</sup>, И. А. Тутнов<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия  
<sup>1, 2, 3, 4</sup> nrcki@nrcki.ru, <sup>5</sup> andt@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* В труднодоступных районах РФ заметные риски энергетической безопасности автономных агломераций и промышленных зон требуют внимания к вопросам надежности, противоаварийной устойчивости локальных энергосистем малой мощности. *Материалы и методы.* Представлен методологический алгоритм оценки качества различных топологических решений для локальных энергосистем с установками генерации малой электрической мощности. *Результаты и выводы.* В основе алгоритма – имитационное моделирование возможных аварийных событий, повреждений и отказов в работе линий электропередач.

**Ключевые слова:** моделирование, надежность, риск, отказоустойчивость, энергетическая безопасность, распределенная энергосистема, потребитель

**Для цитирования:** Бойкова Т. В., Григорьев А. С., Маколкин Д. В., Королев С. А., Тутнов И. А. Качество и надежность энергосистем малой мощности // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 3. С. 28–37. doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-4

## QUALITY AND RELIABILITY OF LOW-POWER POWER SYSTEMS

T.V. Boykova<sup>1</sup>, A.S. Grigoriev<sup>2</sup>, D.V. Makolkin<sup>3</sup>, S.A. Korolev<sup>4</sup>, I.A. Tutnov<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia  
<sup>1, 2, 3, 4</sup> nrcki@nrcki.ru, <sup>5</sup> andt@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The problem of dependability and emergency stability of local low-power systems require attention due to the risks of energy safety for autonomous agglomerations. This attention is especially important for hard-to-reach territories of the Russian Federation. *Materials and methods.* The article presents an algorithm for assessing the quality of various projects of local power systems with low-power generation plants. *Results and conclusions.* The algorithm is based on simulation modeling of possible emergency events, damages and failures in the operation of power lines

**Keywords:** modeling, dependability, risk, fault tolerance, energy security, distributed power system, consumer

**For citation:** Boykova T.V., Grigoriev A.S., Makolkin D.V., Korolev S.A., Tutnov I.A. Quality and reliability of low-power power systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(3):28–37. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-4

### Введение

Перспективы новых технологий в области безопасного и надежного функционирования системы энергетических установок и линий электропередач определяют актуальность формирования и верификации мер в аспектах энергетической безопасности потребителей энергии. Особую актуальность этой проблеме придают условия жизнедеятельности людей, находящихся в автономных агломерациях с существенно сниженной территориальной транспортной доступностью, для которых характерен сезонный характер поставки запасов топливных и иных энергетических ресурсов. Поиск решений этой проблемы в ряде случаев связан с проектированием надежной с высоким потребительским качеством системы сетевого энергоснабжения потребителей. Для энергетической безопасности автономных потребителей энергии малой мощности, которые дислоцированы в регионах с децентрализованным снабжением топливно-энергетическими ресурсами, проектирование энергосетей с оценкой их надежности и противоаварийной устойчивости имеет существенное значение.

В апробированных концепциях совершенствования национального российского энергетического комплекса декларируется необходимость широкого применения современных технологий для

решения проблемы энергетической безопасности населения и промышленности регионов [1–3], иных потребителей. В общем случае инженерная система проектирования, эксплуатации энергетических сетей для поставки потребителям электроэнергии, горячей воды и пара характеризуются большим набором факторов влияния на их функциональную безопасность и надежность, многомерной неопределенностью внешних опасных воздействий. Эти обстоятельства значительно усложняют управление рисками энергетической безопасности потребителей. Поэтому становится очевидным, что при проектировании локальных сетей энергоснабжения автономных потребителей, дислоцируемых в труднодоступных районах с децентрализованной схемой поставок топлива и энергии, выполнять нормы функциональной безопасности в аспектах деятельности энергетических объектов, реализовать требования надзорных органов в энергетике, промышленности и других секторах экономики страны, наиболее предпочтительно на базе широкого использования программно-целевого метода управления рисками. В целом проблема управления рисками и качеством поставки энергии автономному потребителю является актуальной, но она пока недостаточно изучена. В частности, еще только предстоит сформировать, верифицировать и апробировать перечень основных факторов риска, отказа, повреждения и разрушения локальных энергетических сетей с учетом оригинальных особенностей энергообеспечения регионов Российской Федерации и их труднодоступных территорий с низкой плотностью населения, автономных по роду своей деятельности промышленных и экономических зон.

Особенно это важно для потребителей, дислоцируемых вдали от основных топливно-энергетических транспортных сетей, для которых подключение к единой энергетической системе России затруднительно и экономически нецелесообразно. В основном энергоснабжение потребителей в этих районах производится за счет местной генерации с использованием дефицитных местных, а также привозных топливных ресурсов, в ряде случаев возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Этот факт определяет необходимость индивидуального подхода при проектировании локальных сетей энергоснабжения, особенно в части моделирования возможных сценариев отказов энергоснабжения автономных потребителей. Для таких проектов становится важным имитационное моделирование надежности и безопасности сетей с различными вариантами сценариев использования возможностей малой локальной генерации. Особенно актуальной данная задача становится в формате проектов генеральных схем энергоснабжения в случае локального (один источник и несколько автономных потребителей), местного или районного (несколько источников и потребителей), для которых характерно использование различных источников генерации по принципу действия, основному виду используемого топлива и т.д. При этом будущая работа таких источников генерации предпочтительно должна осуществляться в автоматическом режиме при минимальном техническом обслуживании и предупредительном ремонте.

В настоящее время имеется ряд инновационных проектов в Норвегии и в других странах, направленных на создание и эксплуатацию локальных многоузловых энергосистем в составе отдельных автономных потребителей и конечного числа установок генерации энергии, которые реализуются в формате распределенных энергетических сетей (РЭС) [2], например, проекты РЭС для энергоснабжения поселков геологических партий, автономных метеостанций, систем экологического мониторинга окружающего мира и пр. Использование в этих проектах вариантов сетей постоянного тока упрощает организацию необходимых перетоков электроэнергии между узлами сети в нужных на данный момент направлениях. Поэтому важно предложить метод, который позволяет адекватно формировать новые проектные решения по будущему облику энергетической сети для энергоснабжения автономных потребителей малой мощности и оценивать их качество. Например, такие проекты, которые позволяют включить в состав РЭС системы накопления и хранения энергии, являющиеся в различные моменты времени как «генератором», так и «потребителем».

Системно ориентированное проектирование и имитационное моделирование процессов поведения локальных РЭС для текущего периода развития энергетики представляет практический интерес для повышения энергетической безопасности территорий РФ. Положительный эффект от современных усилий по модернизации энергетической инфраструктуры и строительства новых объектов малой энергетики для развития промышленного и экономического потенциала арктического региона РФ в значительной степени зависит от технологии проектирования. Этот эффект усиливается от последующей длительной эксплуатации локальных и мобильных автономных систем энергоснабжения на принципах энергоэффективности, экологической приемлемости, экономической целесообразности и промышленной безопасности. Таким образом, формулируется научная задача о методе моделирования поведения и оценки надежности, качества локальных энергосистем с энергоустановками малой

мощности для решения проблем энергетической безопасности автономных потребителей энергии, дислоцируемых в малонаселенных и труднодоступных районах страны.

### Метод и путь решения задачи

В нашем случае прогнозирование надежности энергосистем с автономными энергоустановками малой мощности основано на формировании сценариев их возможной будущей эксплуатации. В основе метода прогнозирования лежит свод общепринятых комплексных принципов энергетической безопасности потребителей энергии, энергоэффективности, качества процесса поставки и потребления энергии, рационального природопользования и экологической приемлемости технологий генерации и передачи энергии [4–6]. Метод реализуется путем вычислительного эксперимента по определению вероятностных показателей надежности по критериям возможного отказа и противоаварийной устойчивости в период эксплуатации РЭС. Для примера реализации данного метода решения поставленной задачи выбран вариант РЭС на постоянном токе. Информационную модель вычислительного эксперимента поясняет диаграмма Исикавы на рис. 1.

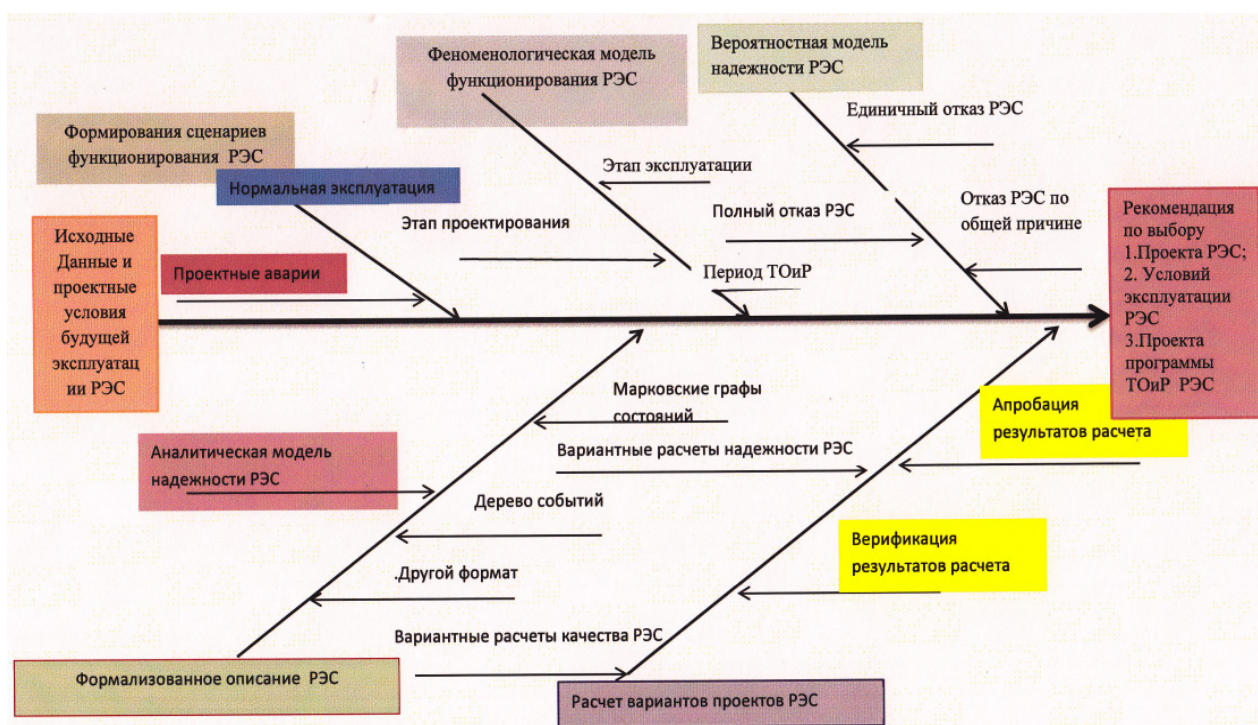


Рис. 1. Основные этапы имитационного моделирования РЭС

Исходными данными для расчета являются сведения из генеральной схемы энергоснабжения, перспективный план социально-экономического развития территории, будущей дислокации РЭС, сведения о природно-климатических и других существенных обстоятельствах, важных для функциональной безопасности РЭС и энергетической безопасности ее потребителей. На базе этих данных формируется перечень исходных событий и условий, которые могут привести к аварийной ситуации РЭС. Затем проводится вербальное описание событий и обстоятельств, которые могут привести к факту отказа РЭС и рискам для ее клиентов. Данное описание детализируется для нормальных, плановых условий будущей эксплуатации сети и для возможных аварийных ситуаций, в том числе от опасных природно-климатических внешних воздействий. Затем формируются схемы и сценарии возможных отказов РЭС и разрабатывается, верифицируется комплексная имитационная модель качества проекта сети. Прогнозирование надежности и оценка качества проектного решения по сети в нашем случае выполняются по показателям: вероятностного анализа функциональной безопасности будущего функционирования РЭС для длительного периода эксплуатации; противоаварийной устойчивости сети к внешним опасным воздействиям, риска для потребителей энергии, в аспектах возможного нарушения функционирования сети в части выполнения служебной функции по устойчивому и бездефицитному обеспечению энергией всех потребителей, клиентов сети.



### Пример решения задачи

Для проектирования и создания РЭС для локального и местного секторов энергоснабжения автономных потребителей энергии в НИЦ «Курчатовский институт» развивается методология проектирования и создания многоузловой РЭС на постоянном токе. Отличительная особенность данного проектирования – автономные потребители обеспечивают себя энергией от собственных источников генерации, излишки произведенной энергии могут экспортировать в узловую РЭС. Эту экспортируемую энергию могут использовать другие автономные потребители РЭС, которые по каким-либо причинам имеют в этот период дефицит электроэнергии. Если все потребители РЭС полностью удовлетворяют в данный период времени свои потребности в электроэнергии, то ее общесетевые излишки могут накапливаться как в едином общесетевом аккумуляторе(-ах), в том числе и на основе производства электролизного водорода, так и индивидуальных аккумуляторах автономных потребителей. Перспективная схема построения узловой РЭС на локальном уровне отдельного поселения приведена на рис. 2.

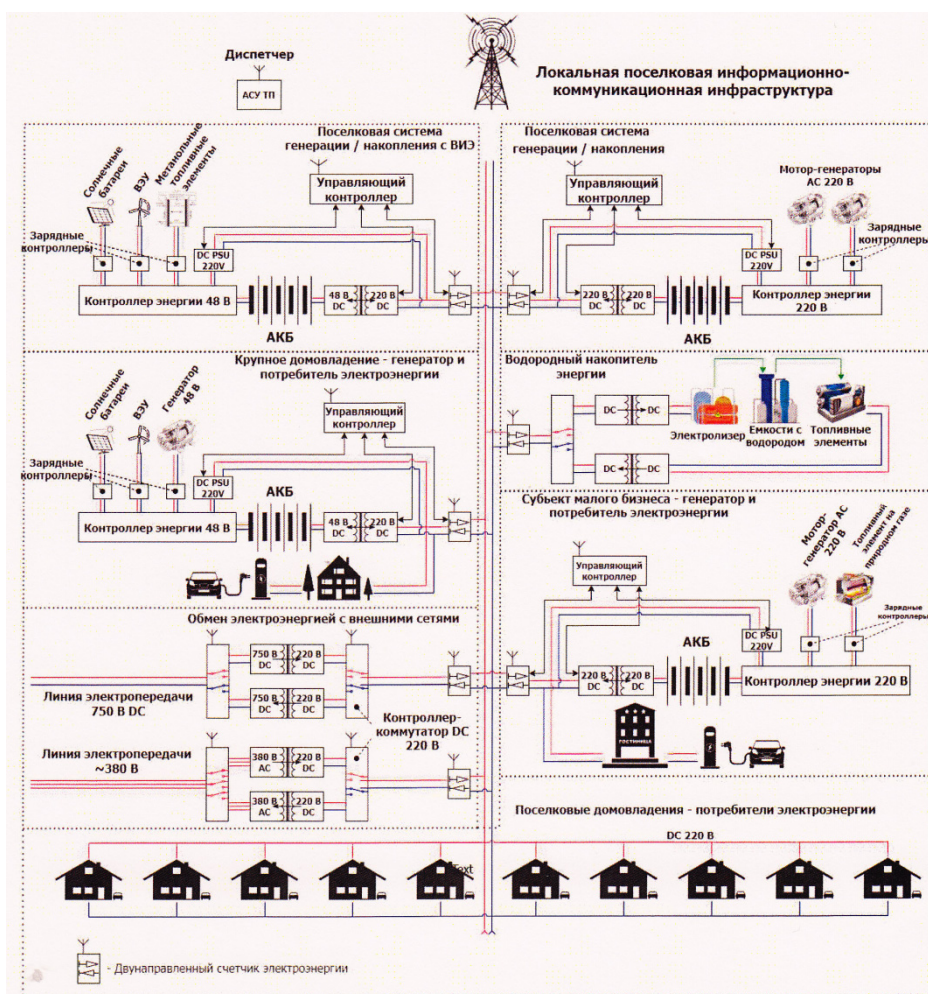


Рис. 2. Распределенная сеть узла – поселка

Рассматриваемые в рамках реализации перспективного проекта локальные РЭС могут включать в себя некоторое количество «узлов». Узлом может служить, например, солнечный генератор, который включает в себя блок солнечных батарей, аккумуляторную батарею (АКБ) с зарядным контроллером и DC/DC конвертер, нормализующий выходное напряжение солнечного генератора до стандартного. Также узлом может быть любая комбинация генераторов – солнечная батарея (СБ), ветрогенератор (ВГ), топливный элемент (ТЭ), дизель-генератор (ДГ), работающий на единую аккумуляторную батарею с выходным DC/DC контроллером. Узел может, кроме генераторов, иметь потребителей, таких как, например, жилой дом с солнечными батареями на крыше или с дизельгенератором в подвальном помещении. Наконец узлом может быть общественное аккумуляторное

хранилище, которое запасает излишки электроэнергии, не используемые потребителями. Таким образом, неперенные признаки узла – наличие источника электроэнергии и двунаправленного DC/DC конвертера, соединенного с сетью, объединяющей кластер. В кластере могут быть потребители, которые подключаются к РЭС непосредственно без DC/DC конвертеров. Возможный состав кластера представлен на рис. 3.



Рис. 3. Состав кластера РЭС

Перспективный проект РЭС предполагает возможность масштабирования вышеприведенной схемы по аналогии с сотами для передачи энергии на расстояние (рис. 4).

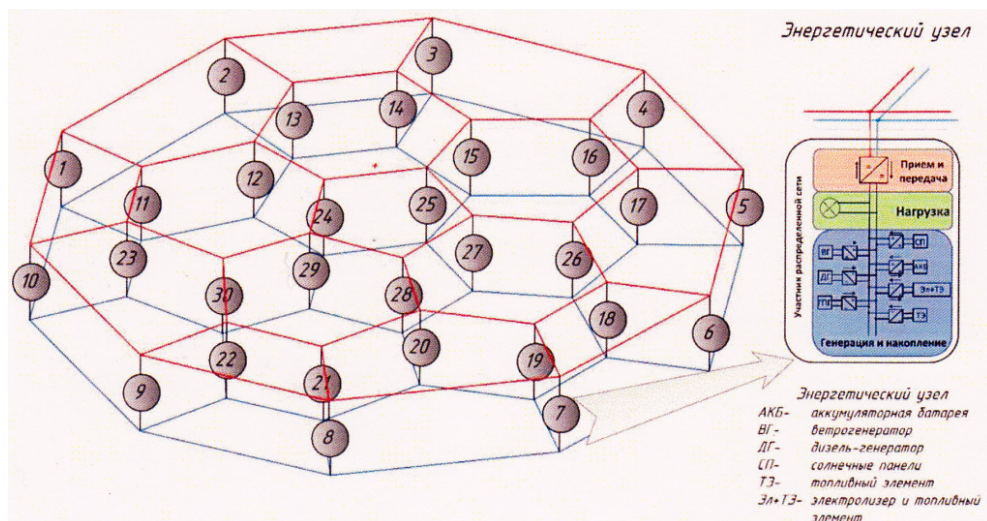


Рис. 4. Объединение узловых микросетей в РЭС для территории с децентрализованным энергоснабжением

РЭС на постоянном токе может создаваться в окружении уже существующих сетей на переменном токе. Например, когда на территории уже имеется одна центральная электростанция со своей сетью переменного тока, а дальнейшее подключение прилегающих к ней новых еще неэлектрифицированных территорий осуществляется распределенными сетями на постоянном токе, имеющими более высокую отказоустойчивость и меньшие потери при передаче энергии на большие расстояния.

Для решения задачи проектирования РЭС разработано оригинальное программное средство, которое предназначено для моделирования отказов линий электропередач такой сети. Потребители, источники генерации, узлы и кластеры РЭС, схема их соединения линиями электропередач являются исходными данными для моделирования. Аварийными событиями РЭС являются отказы линий электропередач, по выбранным возможным сценариям (фиксированное количество за назначенный период, случайное количество от 0 до  $N$  за период эксплуатации или его какая-то часть, отказы с заданной вероятностью по времени проявления разрушительных или пожароопасных событий на заданном периоде и пр.). Расчетное моделирование развития событий отказов ведется пошагово. На каждом шаге предполагаются обрывы линий электропередачи и определяется количество линий, соединяющих каждого участника, клиента с РЭС, и определяется, произошел ли частичный или полный отказ РЭС. Под частичным отказом подразумеваются следующие сценарии: какой-либо узел не имеет электрических связей ни с одним другим узлом; количество электрических связей какого-либо узла стало меньше заданного проектом минимального количества электрически связанных узлов  $m$ . Под полным отказом системы подразумеваются следующие сценарии: когда все линии передачи энергии вышли из строя (разрушены); когда не осталось узлов, количество электрических связей в которых больше заданного проектом минимального количества узлов  $m$ . По завершении всех вычислительных экспериментов программа переходит к вычислению показателей надежности и безопасности: сколько раз при заданных параметрах моделирования был обнаружен первый частичный отказ РЭС относительно общего количества вариантов моделирования поведения РЭС; средний период времени обнаружения первого частичного отказа РЭС; среднее количество отказов линий до момента частичного отказа РЭС; сколько раз при заданных параметрах моделирования был обнаружен полный отказ системы относительно общего количества экспериментов; средний период времени обнаружения полного отказа системы; среднее количество отказов линий до момента полного отказа системы.

*Пример результатов расчетов возможных отказов РЭС.* Для анализа влияния проектных решений РЭС на их надежность, противоаварийную устойчивость и качество проведено сравнение проектов сетей с различным количеством потребителей и источников генерации энергии (клиентов сети), в том числе РЭС с равным количеством клиентов при различных вариантах структурных решений по конфигурации сети. Сравнения проводились для двух групп вариантов решений. В первую группу вошли три схемы, состоящие из 12 клиентов РЭС, которые объединяются тремя разными способами «линейная», «кольцевая» и троированная – «трехсвязанная». Схемы «линейная» и «кольцевая» отражают принципы подключения к сети, схожие с подключением автономных потребителей к линейной и закольцованной линии электропередач. Принципиальным отличием таких сетей является возможность получения энергии при одиночном обрыве линии электропередач для «кольцевой» схемы, для «линейной» схемы такая возможность имеется для клиентов, которые имеют соединение только с одним узлом. Схема «трехсвязная» сформирована таким образом, что каждый узел РЭС имеет соединения со своими тремя близко расположенными узлами. Расчеты выполнялись для разного количества повторяющихся вычислений. Результаты расчетов показаны в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Результаты вычислительных экспериментов с различными длинами серий для 12-узловой схемы «тетраэдр»

Номер серии	Серии по 10 испытаний, среднее количество линий	Серии по 20 испытаний, среднее количество линий	Серии по 50 испытаний, среднее количество линий	Серия по 100 испытаний, среднее количество линий	Серия по 500 испытаний, среднее количество линий	Серии по 1000 испытаний, среднее количество линий
1	2	3	4	5	6	7
1	8,5	8	7,68	7,85	7,51	7,593
2	7,5	7,1	8,02	7,41	7,676	7,568
3	6,8	8,25	7,16	7,4	7,62	7,716
4	7,4	7,65	7,66	7,53	7,516	7,563
5	8,2	8,25	7,44	7,36	7,706	7,546
6	8,3	7,45	7,36	7,41	7,726	7,723
7	7,5	7,35	7,56	7,47	7,54	7,7



Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
8	7,8	7,59	7,5	7,77	7,586	7,659
9	7,3	7,65	7,54	7,89	7,52	7,54
10	9,2	7,6	7,18	7,84	7,572	7,715
Среднее значение	7,85	7,689	7,510	7,593	7,5972	7,6323
Полное количество испытаний	100	200	500	1000	5000	10000
Дисперсия средних значений	0,4917	0,14070	0,063756	0,047134	0,006594	0,005979

Таблица 2

Среднее значение количества отказавших линий до первого частичного отказа в трех типах проектных схем с 12 узлами РЭС

Номер серии	Тип схемы		
	«Трехсвязная»	«Линейная»	«Кольцевая»
1	7,85	2,74	3,58
2	7,41	2,57	3,61
3	7,4	2,51	3,98
4	7,53	2,68	3,47
5	7,36	2,49	3,6
6	7,41	2,39	3,69
7	7,47	2,72	3,49
8	7,77	2,52	3,73
9	7,89	2,55	3,7
10	7,84	2,43	3,74
Среднее значение	7,593	2,56	3,659
Полное количество испытаний	1000	1000	1000
Дисперсия	0,047134444	0,014155556	0,021521111

Таким образом, расчетом установлено, что для вычислительных экспериментов из 50 повторяющихся испытаний дисперсия средних значений, полученных в таких условиях, составила менее 1 %, что следует считать удовлетворительной точностью для данного расчета. Далее проводилось сравнение 12-узловых схем по критерию устойчивости к отказам линий электропередач. В ходе такого вычислительного модельного эксперимента проводится сравнение качества различных трех названных выше схем по показателю: «Число отказавших линий до первого частичного отказа РЭС». В ходе эксперимента на каждом периоде моделируется один отказ случайно выбранной линии. Если линия до этого была исправна – линия переходит в состояние «отказ», если линия уже была повреждена ранее – линия так и остается неисправной.

Для оценки устойчивости структурного варианта решения к отказам линий электропередач по отношению к масштабированию размера РЭС при увеличении количества клиентов РЭС проведено сравнение схем с различным количеством узлов и линий передачи энергии. Вычислительный эксперимент по сравнению трехсвязных схем с различным количеством клиентов показал хорошую масштабируемость проектных вариантов РЭС, в которых каждый клиент соединен с тремя соседями. Количество узлов и линий РЭС увеличивается пропорционально числу клиентов. Отказ РЭС может привести к первому частичному нарушению надежности энергоснабжения клиентов, он наступает, когда уже один из клиентов отключается от РЭС. Таким образом, расчетом показана возможность масштабирования РЭС без снижения их противоаварийной устойчивости, в аспекте возможных отказов линий электропередач для локального и местного секторов энергопотребления.

Для оценки влияния технического обслуживания и предупредительно-восстановительных ремонтов (ТОиР) линий электропередач на качество проектных решений РЭС проведена серия вычислительных экспериментов с целью анализа влияния фактов ремонта линий электропередачи на

события проявления частичных или полных отказов РЭС. С практической точки зрения такой анализ позволяет оптимизировать программу ТОиР по срокам выполнения и длительности ремонтных работ. В данном примере для моделирования отказов использовались проектные варианты РЭС, состоящие из 12 и 30 клиентов. Для каждого варианта проекта анализировались различные схемы соединений. РЭС из 12 клиентов образовывали схемы «кольцевую» и «трехсвязанную», а из 30 участников – «кольцевую», «трехсвязанную» и «четырёхсвязанную» (рис. 5).

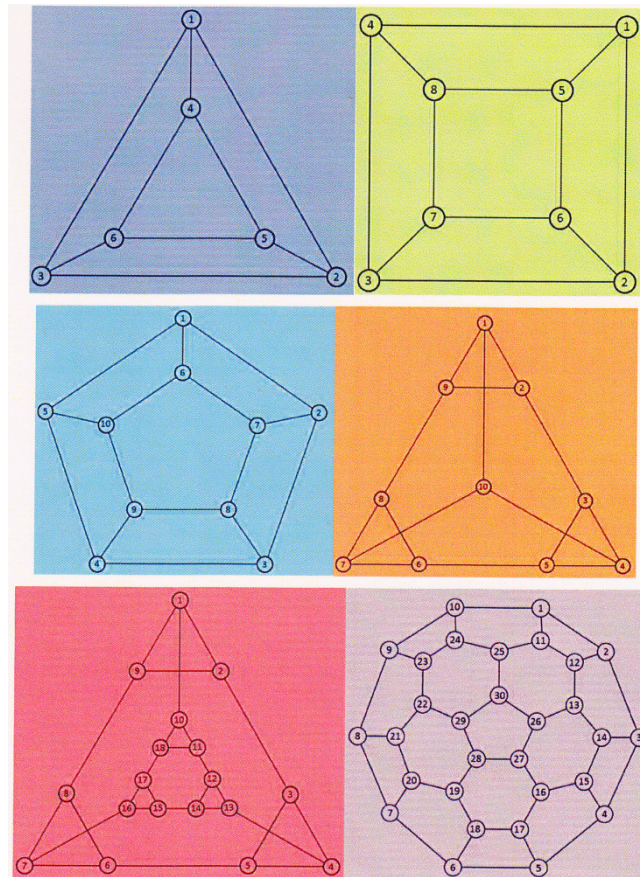


Рис. 5. Схемы соединения РЭС с числом клиентов: 6, 8, 10, 12, 18 и 30

В данном расчете для каждой схемы задавалось начальное состояние, когда все линии исправны, а количество отказов за шаг моделирования изменялось от 0 до  $n$ , где  $n = 5$ . В ходе вычислительных экспериментов производилось определение средней длительности периода до первого частичного отказа РЭС при заданном числе от 0 до 10 восстановлений ремонтных линий электропередачи за один период моделирования. По результатам 2000 вычислительных экспериментов определялась зависимость среднего времени до первого частичного отказа РЭС. Для оценки качества проектных решений по РЭС в аспектах программы ТОиР проведен анализ перспективности программы проектного предупредительно-восстановительного ремонта РЭС, когда восстановление линий электропередачи производится на шаге по времени, следующем после шага, на котором данные линии вышли из строя. Особенность такой программы ТОиР заключается в том, что для местностей, имеющих ограниченную доступность, время реагирования и исправление обрывов сети может быть значительным. Вследствие этого факта, даже если потенциальные возможности аварийной ремонтной бригады обеспечивают ремонт максимально возможного количества обрывов в сети за период моделирования, в этом сценарии частичные отказы РЭС все будут происходить из-за увеличенного времени реагирования ремонтной бригады. По мере повышения потенциала возможностей для быстрого реагирования ремонтной бригады для превентивного предупреждения отказов РЭС график показателя противоаварийной устойчивости сети по времени проходит этап начального медленного роста, перемещается в этап выхода в насыщение, когда дальнейшее повышение потенциала возможностей и численности ремонтной бригады перестает давать значимое улучшение устойчивости РЭС к отказам.



### Заключение

Полученные в рамках проведенных вычислительных исследований результаты показывают, что определенное усложнение структурных решений в проектах РЭС способствует соответствующему увеличению их качества. В частности, повышается противоаварийная устойчивость РЭС к таким событиям, как обрывы линий электропередач в проектах более сложных по сравнению с линейной и кольцевой структурами энергетической сети. Показанный выше вариант проекта РЭС в формате «тройничества – трехсвязности», когда каждый клиент РЭС соединен с тремя соседями, позволяет спланировать оптимальную стратегию планирования и проведения ТОиР, вышедших из строя линий электропередачи для локального и местного вариантов секторов децентрализованного энергопотребления для территорий регионов в труднодоступных и малозаселенных зонах РФ. Применение инструментов вычислительного эксперимента для моделирования процесса отказов и выявления их последствий для энергоснабжения участников локальных и местных РЭС закладывает основу для расширения перечня превентивных воздействий на состояние сети для повышения ее функциональной надежности и в конечном итоге качества энергообеспечения автономных потребителей в труднодоступных регионах страны и их энергетической безопасности.

Дальнейшее исследование процессов генерации, передачи и потребления электрической энергии в таких распределенных энергетических сетях представляет практический интерес, особенно в аспектах повышения их устойчивости к случайному или умышленному деструктивному воздействию. Для реализации такого подхода к анализу качества проектов РЭС требуется проведение более детальных исследований с полномасштабным моделированием потребления и генерации энергии в отдельных узлах, возможных отказов в энергоснабжении клиентов сети с учетом циклов потребления/генерации для локальных узлов сети с ВИЭ, что может быть выполнено в будущем с помощью комплексного программного средства имитационного моделирования. Для решения задачи проектирования РЭС разработано оригинальное программное средство, которое предназначено для моделирования отказов линий электропередач такой сети. Потребители, источники генерации, узлы и кластеры РЭС, схема их соединения линиями электропередач являются исходными данными для моделирования.

### Список литературы

1. Пименов А. О., Куликов Д. Г., Гольцов Е. Н., Гречко Г. И. Энергообеспечение в Арктике. Перспективы и проблематика развития малой атомной генерации в качестве источника энергоснабжения месторождений и удаленных объектов // Деловой журнал NEFTEGAZ.RU. 2018. № 1. С. 24–29.
2. Чистов И. В., Янсон С. Ю. Энергетическая безопасность в системе национальной безопасности Российской Федерации // Военный академический журнал. 2014. № 2. С. 94–100.
3. Воропай Н. И., Марченко О. В., Стенников В. А. Проблемы энергоснабжения регионов в энергетической стратегии России до 2030 г. и перспективы развития АЭС малой мощности // Атомная энергия. 2011. Т. 111, вып. 5. С. 262–268.
4. Ершов Г. А., Гавриленко В. М., Козлов Ю. И. Обеспечение надежности и безопасности ядерных энергетических объектов в процессе проектирования. Методология и практика // Теплоэнергетика. 2004. № 2. С. 56–59.
5. Барзов А. А., Сысоев Н. Н. Физико-технологическая инноватика. М. : МГУ имени М. В. Ломоносова, 2020. 258 с.
6. Григорьев А. С., Карасевич В. А., Пименов А. О. [и др.]. Научные положения и принципы проектирования, эксплуатации и вывода из эксплуатации источников генерации энергии для автономных потребителей малой мощности // Наука и техника в газовой промышленности. 2019. № 2. С. 92–103.

### References

1. Pimenov A.O., Kulikov D.G., Gol'tsov E.N., Grechko G.I. Energy supply in the Arctic. Prospects and problems of development of small nuclear generation as a source of energy supply for deposits and remote facilities. *Delovoy zhurnal NEFTEGAZ.RU = Business Journal NEFTEGAZ.RU*. 2018;(1):24–29. (In Russ.)
2. Chistov I.V., Yanson S.Yu. Energy security in the national security system of the Russian Federation. *Voennyi akademicheskij zhurnal = Military Academic Journal*. 2014;(2):94–100. (In Russ.)
3. Voropay N.I., Marchenko O.V., Stennikov V.A. Problems of regional energy supply in the energy strategy of Russia until 2030 and prospects for the development of low-power nuclear power plants. *Atomnaya energiya = Atomic energy*. 2011;111(5):262–268. (In Russ.)
4. Ershov G.A., Gavrilenko V.M., Kozlov Yu.I. Ensuring the reliability and safety of nuclear power facilities in the design process. Methodology and practice. *Teploenergetika = Thermal power engineering*. 2004;(2):56–59. (In Russ.)

5. Barzov A.A. Sysoev N.N. *Fiziko-tehnologicheskaya innovatika = Physico-technological innovation*. Moscow: MGU imeni M.V. Lomonosova, 2020:258. (In Russ.)
6. Grigor'ev A.S., Karasevich V.A., Pimenov A.O. et al. Scientific provisions and principles of design, operation and decommissioning of energy generation sources for autonomous low-power consumers. *Nauka i tekhnika v gazovoy promyshlennosti = Science and technology in the gas industry*. 2019;(2):92–103. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Татьяна Владимировна Бойкова

аспирант,  
Национальный исследовательский центр  
«Курчатовский институт»  
(Россия, г. Москва, площадь Академика Курчатова, 1)  
E-mail: nrcki@nrcki.ru

#### Александр Сергеевич Григорьев

кандидат технических наук, начальник отдела,  
Национальный исследовательский центр  
«Курчатовский институт»  
(Россия, г. Москва, площадь Академика Курчатова, 1)  
E-mail: nrcki@nrcki.ru

#### Дмитрий Владимирович Маколкин

начальник группы,  
Национальный исследовательский центр  
«Курчатовский институт»  
(Россия, г. Москва, площадь Академика Курчатова, 1)  
E-mail: nrcki@nrcki.ru

#### Сергей Андреевич Королев

начальник группы,  
Национальный исследовательский центр  
«Курчатовский институт»  
(Россия, г. Москва, площадь Академика Курчатова, 1)  
E-mail: nrcki@nrcki.ru

#### Игорь Александрович Тутнов

доктор технических наук, начальник лаборатории,  
Национальный исследовательский центр  
«Курчатовский институт»  
(Россия, г. Москва, площадь Академика Курчатова, 1)  
E-mail: andt@mail.ru

#### Tatyana V. Boykova

Postgraduate student,  
National Research Center  
"Kurchatov Institute"  
(1 Akademika Kurchatov square, Moscow, Russia)

#### Aleksandr S. Grigoriev

Candidate of technical sciences, head of department,  
National Research Center  
"Kurchatov Institute"  
(1 Akademika Kurchatov square, Moscow, Russia)

#### Dmitriy V. Makolkin

Head of the group,  
National Research Center  
"Kurchatov Institute"  
(1 Akademika Kurchatov square, Moscow, Russia)

#### Sergey A. Korolev

Head of the group,  
National Research Center  
"Kurchatov Institute"  
(1 Akademika Kurchatov square, Moscow, Russia)

#### Igor A. Tutnov

Doctor of technical sciences, head of the laboratory,  
National Research Center  
"Kurchatov Institute"  
(1 Akademika Kurchatov square, Moscow, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию / Received 06.05.2023**

**Поступила после рецензирования / Revised 07.06.2023**

**Принята к публикации / Accepted 03.07.2023**