

Надежность локальных энергосистем на базе автономных установок генерации

Dependability of local power systems based on autonomous generation units

Григорьев А.С.¹, Маколкин Д.В.¹, Тутнов И.А.^{1*}
Alexander S. Grigoriev¹, Dmitry V. Makolkin¹, Igor A. Tutnov^{1*}

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Российская Федерация

¹National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russian Federation

*Tutnov_IA@nrcki.ru



Григорьев А.С.



Маколкин Д.В.



Тутнов И.А.

Резюме. Цель. Цель работы состоит в создании и верификации методов прогнозирования надежности автономного энергоснабжения локальных потребителей малой мощности. **Методы.** В работе применяются инструменты имитационного моделирования: методы вычислительного эксперимента для прогнозирования надежности и безопасного ресурса эксплуатации автономных кластерных распределенных энергетических сетей, которые включают в свой состав разные установки генерации энергии, линии электропередачи и автоматизированную систему саморегулирования для диверсификации рисков отказов. **Результаты.** На базе методов вероятностного анализа безопасности технических систем прогнозируется надежность энергоснабжения в аспектах возможных отказов при функционировании энергетических сетей и угроз для жизнедеятельности потребителей. Путь решения задачи – моделирование и прогнозирование момента возникновения отказа энергетической сети – критические нарушения проектных условий функционирования, авария и т.д. Этот сценарный путь позволяет для длительного периода эксплуатации моделировать ситуации отказов вследствие деградации и разрушения элементов, агрегатов, линий электропередач, и отказов в условиях многомерной неопределенности прогнозирования надежности и качества энергоснабжения. Основным результатом моделирования является свод рекомендаций по обеспечению энергетической безопасности потребителей. Представлен результат моделирования показателей надежности, анализ влияния на надежность и энергетическую безопасность потребителей структурных решений об облике проекта распределенных энергетических сетей. **Заключение.** Использование вычислительного эксперимента и результатов моделирования надежности при энергоснабжении потребителей, в аспектах прогнозирования вероятностных индикаторов отказов оборудования и элементов кластерных энергетических сетей, выявления их последствий для энергетической безопасности жизнедеятельности малонаселенных и труднодоступных дислокаций, закладывает основу для управления качеством энергетической сети. При этом открывается перспектива в дальнейшем включать в модель дополнительные причины и исходные события для изучения фактов отказов. Например, такие причины, как неравномерность процессов генерации с использованием возобновляемых источников, конечность запаса топлива для традиционных источников генерации, надежность работы персонала энергетической сети. Предложенный подход позволяет верифицировать перспективные новые проектные решения по будущему облику энергетической сети, например, включить в состав распределенной энергетической сети системы накопления и хранения энергии, являющиеся в различные моменты времени как «генератором», так и «потребителем». Имитационное моделирование процессов поведения локальных энергетических сетей представляет практический интерес и важно для повышения их потребительского качества, противоаварийной устойчивости к опасному воздействию со стороны окружающего мира.

Abstract. Aim. The paper aims to create and verify methods for predicting the dependability of autonomous power supply to local low-power consumers. **Methods.** The work uses simulation tools, i.e., computational experiment for predicting the dependability and safe service life of autonomous cluster distributed energy networks that include various power generation installations, power transmission lines and an automated self-regulation system for the purpose of diversifying the risks of failure. **Results.** Using methods of probabilistic analysis of technical system safety, the dependability of power supply is predicted in terms of possible energy network failures and threats to the life of consumers. The problem can be solved by simulating and predicting the moment of failure of a power network, i.e., critical violation of design conditions, accident, etc. This scenario allows – for long periods of operation – simulating failure situations due to degradation and destruction of elements, units, power lines, as well as failures under multidimensional uncertainty of prediction of dependability and quality of power

supply. The key output of simulation is a set of recommendations to ensure energy security. The paper presents simulated dependability indicators, analysis of the effect of structural design solutions underlying a distributed energy network on the dependability and energy security.

Conclusion. The use of computational experiments and results of power supply dependability simulation as part of predicting probabilistic indicators of failures of equipment and elements of cluster energy networks, identifying their consequences for the energy security of sparsely populated and remote locations lays the foundation for quality management of energy networks. Additionally, in the future, additional causes and initial events may be included in the model for the purpose of studying the facts of failures. For instance, such causes as uneven generation using renewable sources, finite fuel supply for conventional generation sources, reliability of the power grid personnel. The proposed approach allows verifying promising new energy network design solutions, for example, including energy storage systems into a distributed energy network that – at various points in time – may be either “generators” or “consumers”. Simulation of local energy networks is of practical interest and is important for improving their consumer quality, resistance to hazardous environmental effects.

Ключевые слова: моделирование, надежность, энергетическая безопасность, распределительная сеть, риск, потребитель.

Keywords: simulation, dependability, energy security, distribution network, risk, consumer.

Формат цитирования: Григорьев А.С., Маколкин Д.В., Тутнов И.А. Надежность локальных энергосистем на базе автономных установок генерации // Надежность. 2024. №1. С. 41-50. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-1-41-50>

For citation: Grigoriev A.S., Makolkin D.V., Tutnov I.A. Dependability of local power systems based on autonomous generation units. *Dependability* 2024;1:41-50. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-1-41-50>

Поступила: 27.07.2023 / **После доработки:** 15.01.2024 / **К печати:** 15.03.2024

Received on: 27.07.2023 / **Revised on:** 15.01.2024 / **For printing:** 15.03.2024

Введение

Разработка научных подходов и принципов прогнозирования надежности автономного энергоснабжения локальных потребителей малой мощности, которые дислоцируются в местах, удаленных от магистральных сетей транспорта топлива и электроэнергии, является важной для безопасной жизнедеятельности в арктической зоне РФ [1] и в других малонаселенных, труднодоступных регионах страны. Энергоснабжение на таких территориях, как правило, обеспечивается за счет локальной генерации с использованием местных и завозных ресурсов, часто на энергоустановках комбинированного типа, где вместе с традиционными технологиями для производства электрической и тепловой энергии, использования органического топлива, стали применять перспективные способы на базе возобновляемых видов энергии, мирного атома, аккумуляторов энергии и др. [2]. Современные локальные энергетические комплексы обеспечивают высокое качество энергетической безопасности потребителей, в том числе реализуют возможность своевременно замещать генерирующие мощности, выведенные из эксплуатации на время ремонта, технического обслуживания или вследствие аварий или иных угроз для локальных потребителей, которые дислоцируются на труднодоступных территориях.

Надежная и безаварийная эксплуатация локальной энергетики Арктики требует высококачественного выполнения верификационных исследований безопасности и разумности проектов для создания, эксплуатации и вывода из эксплуатации отдельных источников энергии

или комплексов распределенных энергетических сетей (РЭС), а также адекватной экологической и экономической, социальной приемлемости таких проектов [3].

Аналитический и экспертный анализ доступных публикаций и мнение многих экспертов [1, 3–8] по проблемам развития малой энергетики и локальных энергетических комплексов показывает актуальную потребность для энергетической безопасности потребителей в малонаселенных удаленных территориях РФ: в новой разработке научных положений, принципов, критериев и инструментальных методов верификации и валидации надежности будущих проектов оборудования для гибридных энергетических установок и комплексов, сетей децентрализованного энергообеспечения, РЭС. Важным для таких потребителей становится развитие методических основ и адекватных методов для целевого имитационного моделирования и исследование возможных сценариев поведения локальных автономных энергетических систем на периоде от монтажа до момента отказа (аварии, разрушения, замены).

Данная статья посвящена рассмотрению вопросов улучшения качества оценки надежности отдельных компонентов, и в целом локальных энергосистем на базе автономных источников генерации энергии малой мощности. В текущий момент деятельность проектировщиков РЭС не обеспечена достаточно развитой и полно верифицированной методической и нормативной базой для системы оценки надежности и противоаварийной устойчивости на этапах проектирования и эксплуатации кластерных гибридных энергосистем и энергетических

установок, комплексов малой установленной мощности, предназначенных для работы в автономном автоматизированном режиме. Часто для энергоснабжения локальных потребителей в арктической зоне РФ реализуется оригинальный режим так называемых безлюдных технологий, то есть работа РЭС без возможного оперативного доступа длительное время к источникам генерации в составе локальных РЭС, в том числе в период нарушения проектных условий эксплуатации или аварии. Для этого режима требуется уточнение понятийных определений энергетической безопасности удаленных потребителей энергии в диапазоне малых и сверхмалых мощностей, надежности локальных РЭС для децентрализованного энергоснабжения, как интегрально, так и отдельно взятых компонентов этой сети, включая программное обеспечение для автоматизированных систем контроля технического состояния и управления безаварийной эксплуатацией этих сетей. С учетом направленности постоянных дискуссий в сфере норм надежности сложных технических систем [9] будет важна новая оригинальная систематизация и уточнение критериев надежности, противоаварийной устойчивости энергетической техники автономного потребителя малой энергетической мощности для перспективных проектов локальных и автономных РЭС. Таким образом, в целом содержание данной статьи касается новой разработки научных положений, методов, алгоритмов, оценки качества и верификации технологий конструирования и проектирования, контроля и диагностики, оценки надежности основного и вспомогательного оборудования компонентов РЭС в арктической зоне РФ и входящих в них перспективных установок генерации и аккумуляции, сохранения энергии.

Состояние вопроса прогнозирования надежности локальных энергосистем на базе автономных источников генерации энергии малой мощности

В текущий период перспектива развития автономных РЭС для локальных потребителей в труднодоступных регионах мира обсуждается многими экспертами, особенно часто в аспектах энергетической безопасности (ЭБ) стран и территорий [6–8, 10–12]. На многих научных форумах по проблемам ЭБ рассматриваются современные возможности развития и применение комбинированных и гибридных установок генерации энергии для автономных потребителей энергии малой мощности в арктической зоне и других труднодоступных, малонаселенных районах. Согласно данным [10, 11] в странах Европы в том числе в Греции, Германии, Дании и др., а также в ряде стран Южной Америки, Азии, уже реализуется около 1000 инновационных проектов по созданию локальных РЭС с одним или с многими источниками генерации малой мощности. Основными научными проблемами при реализации таких проектов экспертами называются задачи прогнозирования надежности и противоаварийной устойчивости

РЭС в труднодоступных районах мира со сложными и суровыми климатическими, опасными природными условиями их эксплуатации, а также задачи, связанными с качеством управления рисками и интеграции распределенной генерации в автономные кластерные сети, включая актуальные задачи накопления и хранения энергии, практического надежного, безаварийного функционирования локальных РЭС и отдельных автономных установок генерации с высоким уровнем их энергетической и экономической эффективности для конечного потребителя [12].

В России новый этап развития распределенной энергетики для труднодоступных и малозаселенных территорий стартовал в рамках организационной реформы единой энергосистемы в период 2008–2010 гг. и к текущему моменту многие задачи по представлению гарантий надежности и противоаварийной устойчивости, экологической и экономической приемлемости новых проектов РЭС пока не имеют своего окончательного и апробированного практикой решений. Поэтому актуальность развития методов прогнозной оценки надежности локальных энергосистем на базе автономных источников генерации энергии малой мощности является значимой для текущего момента и на перспективу.

Исходные данные для моделирования надежности локальной сети энергоснабжения автономных потребителей

В основе исходных данных, необходимых для прогнозной оценки надежности энергоснабжения автономных потребителей, дислоцируемых на территориях, значительно удаленных от магистральных сетей электропередачи и топливо обеспечения, лежат следующие основные сведения. Данные о топливно-энергетическом балансе и информация из генеральной схемы энергоснабжения потребителя (территориальных потребителей) энергии [13], включая сведения о возможных первичных и возобновляемых источниках энергии, запасах топлива, в частности о местных малопродуктивных месторождениях углеводородов и иных источников. Проектные данные кластерной РЭС, содержащие сведения о ее архитектуре, составе и количестве энергетических установок генерации, установок и агрегатов потребления энергии и т.д., протяженности и конфигурации электросетей и трубопроводов для передачи энергии, других сооружений, например резервуаров хранения топлива, установок аккумуляции и хранения энергии. Сведения и прогнозы о потребностях в топливе и энергии локальных промышленных зон или агломераций, автономных потребителей энергии, потенциала мощностей для генерации энергии для РЭС, данные о природно-климатических условиях будущей эксплуатации РЭС, включая вероятностные оценки проявления опасных событий и угроз природным или техногенным катастроф, например, определенной силы землетрясений и пр. Сведения о надежности оборудования (ресурс, долговечность) и

компетентности персонала, связанного с проектированием, эксплуатацией, техническим обслуживанием и профилактическим ремонтом РЭС [14].

Для прогнозирования надежности и энергетической безопасности локального потребителя на первом этапе осуществляется проектирование возможных конструктивных вариантов РЭС. Например, в НИЦ «Курчатовский институт» разрабатываются проекты создания перспективных вариантов РЭС [3, 15] с различными установками генерации, в том числе на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Эти проекты оптимизированы по критериям: надежности энергоснабжения потребителя – энергетическая безопасность; надежности функционирования РЭС, в аспектах противоаварийной устойчивости сети; безопасности и экологической приемлемости, экономической эффективности проектных вариантов РЭС для окружающего мира. При этом уделяется особое внимание вероятностным прогнозам и оценкам возможного влияния изменения потребностей у предполагаемых потребителей энергоресурсов РЭС на структуру их технологического энергообеспечения, топливоснабжения для текущего периода и на перспективу. В частности, рассматриваются проектные варианты, когда потребители – участники распределенной сети, смогут бездефицитно обеспечивать себя энергией от собственных энергетических установок, агрегатов на основе ВИЭ, электрогенераторов с малой установленной мощностью и пр., а избыток произведенной энергии могут импортировать в общую РЭС, в системы общесетевой аккумуляции и накопле-

ния энергии [16], в том числе и на основе производства электролизного водорода. Схема возможного локального узла РЭС для отдельного автономного потребителя энергии приведена на рис. 1.

Прогнозирование надежности энергоснабжения локальных потребителей в аспектах возможных отказов при функционировании РЭС.

Моделирование процессов генерации и транспорта энергии в среде отдельных компонентов РЭС с использованием различных источников генерации энергии, в первую очередь ВИЭ, возможными отказами различных элементов РЭС в условиях многомерной неопределенности факторов влияния на противоаварийную устойчивость является оригинальной и трудоемкой инженерной задачей. Для эффективного проведения расчетных исследований надежности РЭС в нашем случае применяется метод имитационного моделирования, методы вычислительного эксперимента, важные для моделирования оценки эффективности и оптимизации параметров надежности РЭС, а также прогнозирования энергетической безопасности автономного потребителя. Концепцию имитационной модели прогнозной оценки надежности РЭС по критериям энергетической безопасности (ЭБ) конечных потребителей в общем виде представляет рис. 2. Для реализации этой модели в НИЦ «Курчатовский институт» разработано программное средство (ПС), которое предназначено для моделирования и исследования фактов возможных отказов компонентов и в целом РЭС, диагностического определения времени возникновения возможного отказа, как случайного, так и вызванного общими причинами.

Моделирование отказов РЭС, в нашем случае с помощью ПС, предполагает в качестве исходных событий: вероятностную возможность повреждения линий электропередач в распределенных системах; проявления фактов техногенных аварий и инцидентов при эксплуатации установок и агрегатов генерации энергии; возможные ошибки и нарушения проектных сроков ремонта, тестирования и пр.; эпизоды возможных повреждений и разрушений компонентов РЭС, как в период их длительной эксплуатации под воздействием физико-технологических механизмов деградации и старения, так и в период природных чрезвычайных ситуаций. Для смягчения возможных угроз для ЭБ конечного потребителя алгоритм имитационного моделирования поведения РЭС позволяет использовать эффекты замещения и дублирование компонентов РЭС, оптимальное перераспределение избыточных на определенный момент генерирующих мощностей у различных участников распределенной системы энергоснабжения.

В качестве исходных данных для оценки надежности РЭС используется описание узлов и технологические схемы, содержащие их координаты на модельной сетке по осям X и Y , тип узлов (с собственной локальной генерацией или нет), а также сведения об узлах, с которыми

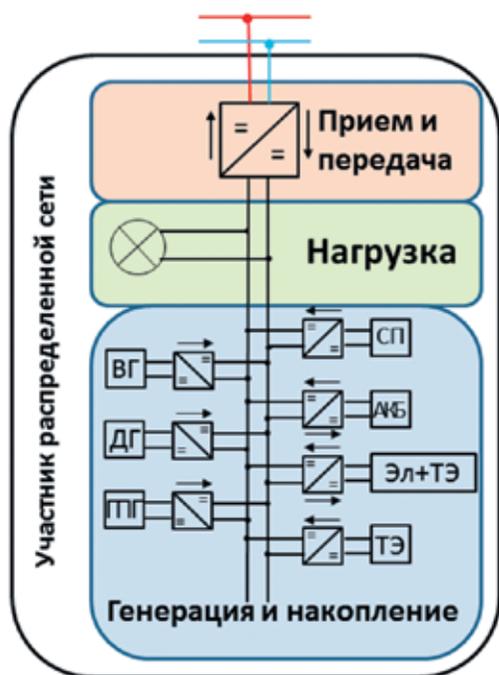


Рис. 1. Схема автономного узла РЭС.

СП – солнечные панели. АКБ – блок аккумуляторных батарей. ВГ – ветрогенератор. ДГ – дизельгенератор.

ТЭ – топливный элемент. Эл – электролизер.

ГПГ – газопоршневой генератор

Концепция имитационной модели прогнозной оценки надежности РЭС по критериям энергетической безопасности (ЭБ) конечных потребителей

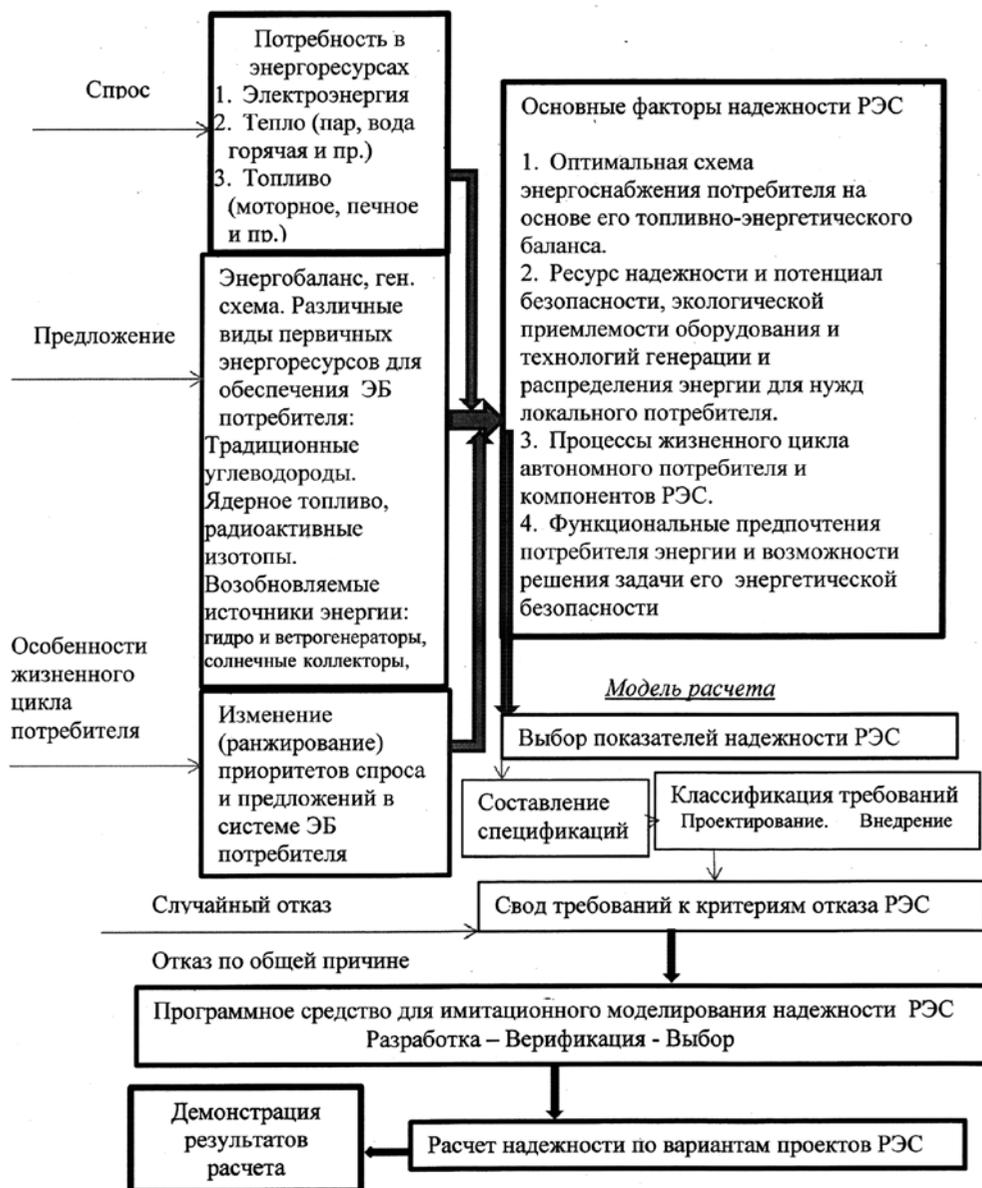


Рис. 2. Модель концепции прогнозной оценки надежности РЭС.

имеются связи. Для расчета используются следующие данные: априорно принятая для заданного периода t_T функционирования РЭС модель отказов: фиксированное количество отказов (от 0 до M) или псевдослучайные отказы с заданной плотностью вероятности; среднестатистическое количество отказов компонентов сетей; потенциал восстановления – возможность ремонтной бригады (предельное количество восстанавливаемых компонентов РЭС за период техобслуживания и ремонта); длительность периода возможных отказов РЭС (часы, дни, месяцы, годы); период моделирования и единицы его измерения; минимальное количество электрически связанных узлов РЭС до момента, когда сеть будет считаться неработоспособной; количество расчетов в период t_T ; а также модель критерия диагностических вычислений:

расчет до минимального количества работоспособных связанных узлов РЭС или до полной потери генерации в сети. Расчет развития процесса отказов во времени ведется пошагово. В реализации процедуры отказов определяется номер линии, разрушаемой на данном шаге и, в случае выполнения расчета с переменным количеством отказов за период, количество отказов линий за период. После разрыва линии электропередачи проводится определение оставшихся линий, подключающих участника к РЭС и определяется факт отключения участников РЭС от энергоснабжения. Для примера расчета используется РЭС, представленная на рис. 3. Для определения средних значений количества отказавших линий до наступления определенного события проводится значительное количество вычислительных экспериментов с одинаковыми

начальными значениями, но с разной псевдослучайной последовательностью и числом отказа линий, проявления фактов аварий на установках генерации и пр.

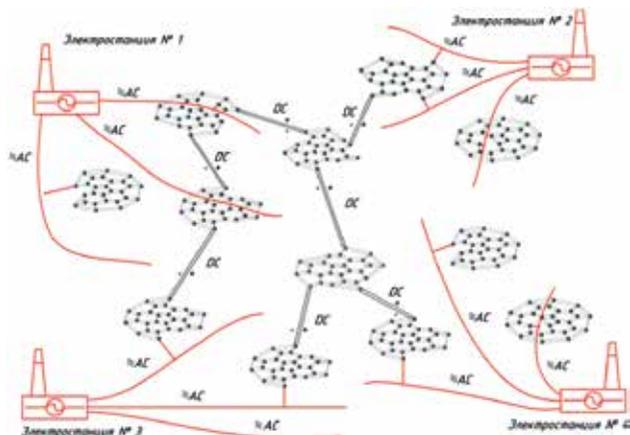


Рис. 3. Пример РЭС для вычислительного эксперимента по оценке надежности энергоснабжения конечного автономного потребителя.

В данном примере алгоритм отказа линии реализуется следующим образом: Случайным образом (с помощью генератора псевдослучайных чисел) из всех линий РЭС выбирается линия, которая считается неисправной, разрушенной. Процесс повторяется, пока не достигается заданное количество (N) отказов линий за период t_r . Если линия была переведена в состояние «неисправной», изменения в ее состоянии не вносятся, а только увеличивается счетчик поврежденных линий за условный период их функционирования. Если выбрана модель переменного количества отказов линий за период (от 0 до N), то перед выполнением вышеприведенного алгоритма случайным образом (с помощью отдельного генератора псевдослучайных чисел) определяется количество линий, которые будут разрушены за период t_r . В случае использования модели случайных отказов, у каждой из линий РЭС есть равная вероятность разрушения. С помощью генератора псевдослучайных чисел формируется значение от 0 до 100. Если сформированное значение меньше заданного пользователем значения, то линия переводится в состояние «разрушенной». Процесс повторяется для всех связей в РЭС. После моделирования ситуации выводятся линии из эксплуатации и начинается работа алгоритма поиска отказов, предназначенный для определения, произошел ли частичный или полный отказ локальной сети. Под частичным отказом РЭС подразумеваются следующие ситуации: какой-либо узел не имеет электрических связей ни с одним другим узлом; произошла сегментация – количество электрических связей какого-либо узла меньше заданного пользователем минимального количества электрически связанных узлов m . Если параметр «Возможность ремонтной бригады» не равен «0», то запускается алгоритм ремонта линий. Случайным образом (с помощью генератора псевдослучайных чисел) из линий РЭС, имеющих состояние «разрушенной», вы-

бирается для потребителя иная линия и она переводится в состояние «исправной». Процесс повторяется, пока не достигается заданное количество ремонтов линий за период t_r . Далее проводится проверка, обнаружен ли полный отказ системы. Под полным отказом системы подразумеваются следующие ситуации: смоделирована ситуация, когда все линии энергоснабжения локального потребителя вышли из строя; смоделирована ситуация, когда не осталось узлов, количество электрических связей которых больше заданного пользователем минимального количества электрически связанных узлов m . Если полный отказ системы обнаружен, то происходит фиксация времени его обнаружения в соответствии с текущим имитируемым периодом, а также количества произошедших до данного периода фактов отказов линий. При условии, что полный отказ системы не был обнаружен, проводится проверка, завершён ли период моделирования. Если период моделирования не завершён, программа возвращается к шагу 0. Если обнаружен полный отказ системы или период моделирования завершён, то текущий вычислительный эксперимент считаем завершённым. Результаты измерений по данному эксперименту фиксируются для возможного последующего анализа. Далее. Проводится проверка, соответствует ли количество проведенных экспериментов предполагаемому количеству тестов, заданному пользователем в начале работы программы. Если нет – происходит переход к шагу 0, начинается очередной вычислительный эксперимент. По завершении всех вычислительных экспериментов программа переходит к вычислению статистических значений, исходя из количества экспериментов и полученных в результате расчетов данных. Цель данного этапа – определить, является ли выборка факторизованной. Далее программа выводит результаты вычислительных измерений для их обсуждения и анализа. Под результатом измерений в нашем случае подразумевается: сколько раз при заданных параметрах моделирования был обнаружен первый частичный отказ РЭС относительно общего количества экспериментов; средний период времени обнаружения первого частичного отказа системы; среднее количество событий отказов линий до момента частичного отказа РЭС; сколько раз при заданных параметрах моделирования был обнаружен полный отказ РЭС относительно общего количества экспериментов; средний период времени обнаружения полного отказа РЭС; среднее количество отказов линий до момента полного отказа РЭС.

Результаты и обсуждение вычислительных экспериментов

Для анализа влияния структурных решений на надежность РЭС и ЭБ автономного потребителя проведено сравнение вариантов проектов сетей с различным количеством участников при различных структурных решениях сети. Сравнения проводились для двух групп структурных решений. В первую группу вошли три схемы, состоящие из 12 участников РЭС, соединенные

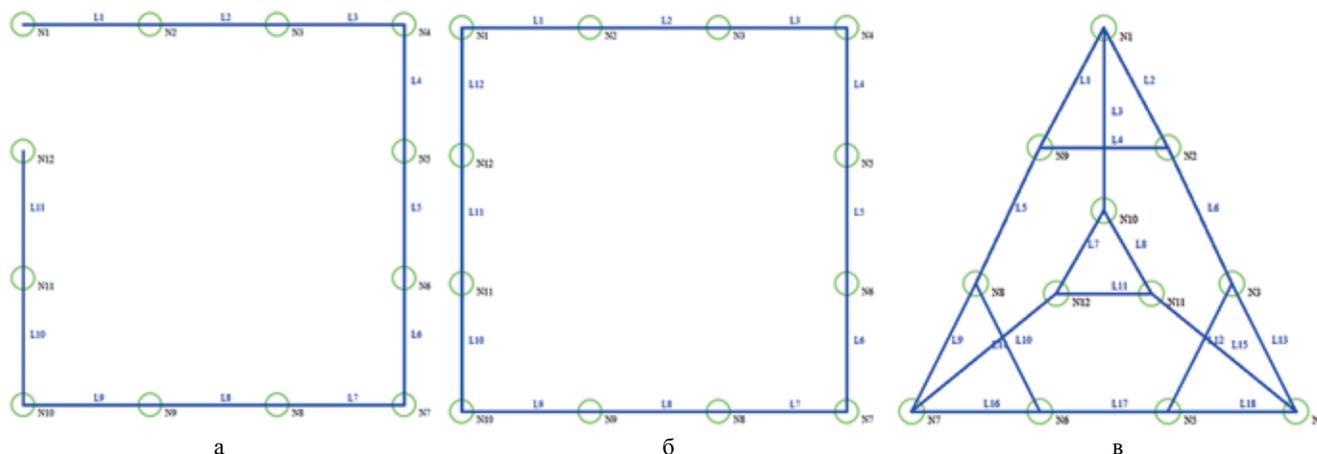


Рис. 4. Схемы соединения участников РЭС: а – «линейная», б – «кольцевая», в – «трехсвязная».

тремя разными способами «линейная», «кольцевая» и троированная – «трехсвязанная» (рис. 4).

Схемы «линейная» и «кольцевая» отражают принципы подключения к сети, схожие с подключением автономных потребителей к линейной и закольцованной линии электропередач. Принципиальным отличием их от централизованных электрических сетей является возможность получения электроэнергии от других участников при одиночном обрыве линии электропередач для «кольцевой» схемы, а для «линейной» схемы такая возможность имеется для участников, которые не являются крайними в сети. Для вычисления погрешности в оценке среднего количества разрушений линий, приводящего к возникновению первого частичного отказа в трех различных схемах подключения 12-и участников РЭС (схемы «усеченный тетраэдр», «линия» и «кольцо») проводился ряд вычислительных экспериментов, по результатам

которых определялись средние значения и их дисперсия (табл. 1). Таким образом, начиная с серий в количестве 50 испытаний, дисперсия средних значений составила менее 1%, что можно считать удовлетворительной точностью. В ходе вычислительного эксперимента проводится сравнение потребительского качества и надежности трех различных схем по параметру «Количество отказавших линий до первого частичного отказа». В ходе эксперимента на каждом периоде формируется один отказ случайно выбранной линии. Если линия до этого была исправна – линия переходит в состояние «отказ», если линия уже разрушена – линия признается неисправной. Результаты экспериментов представлены в табл. 2, где приведены усредненные значения количества отказавших линий, приведших к появлению частичного отказа. Поскольку количество линий исчисляется целыми числами, требуется построение гистограммы распределения количеств

Табл. 1. Оценка факта разрушений линий РЭС, приводящего к возникновению первого частичного отказа, для вычислительных экспериментов с различными длинами серий испытаний для 12-и 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	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
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

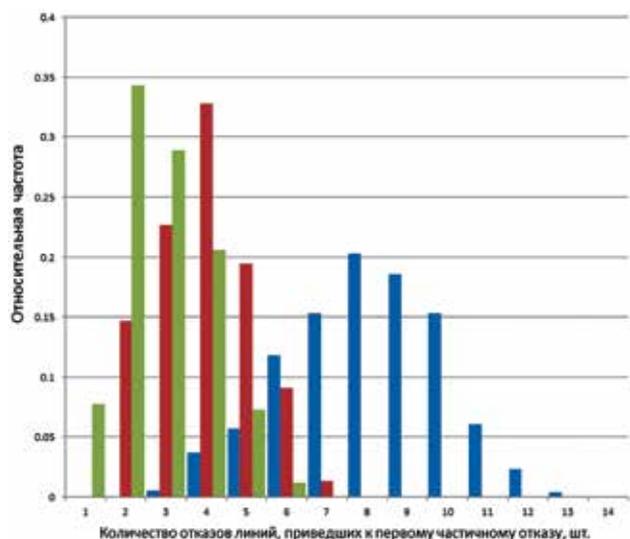


Рис. 5. Относительная частота возникновения частичного отказа РЭС для разных количеств отказавших линий

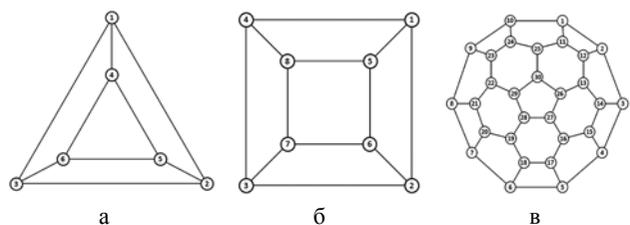


Рис. 6. Схемы вариантов соединения РЭС с разным количеством компонентов участников процесса энергоснабжения, соответственно, равными 6 (а), 8 (б), 30 (в).

отказавших линий до первого частичного отказа РЭС. Гистограмма распределения количества линий, приведших к возникновению частичного отказа для трех схем (рис. 5) позволяет оценить вероятность появления первого частичного отказа РЭС после отказа заданного количества линий. Для оценки устойчивости проектного

Табл. 2. Среднее значение количества отказавших линий до первого частичного отказа в трех типах схем с 12 участниками 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

варианта РЭС к отказам линий электропередач по отношению к ее масштабированию (при увеличении количества участников РЭС) проведено сравнение схем с различным количеством компонентов включая энергоустановки потребителя, линии электропередач. При этом соблюдался принцип соединения каждого компонента – участника сети – с его тремя соседями. Характеристики РЭС и результаты проведения вычислительного эксперимента приведены в табл. 3, а возможные проектные схемы соединения – на рис. 6. Гистограмма распределения количества линий, приведших к возникновению частичного отказа для проектных схем РЭС, приведена на рис. 7.

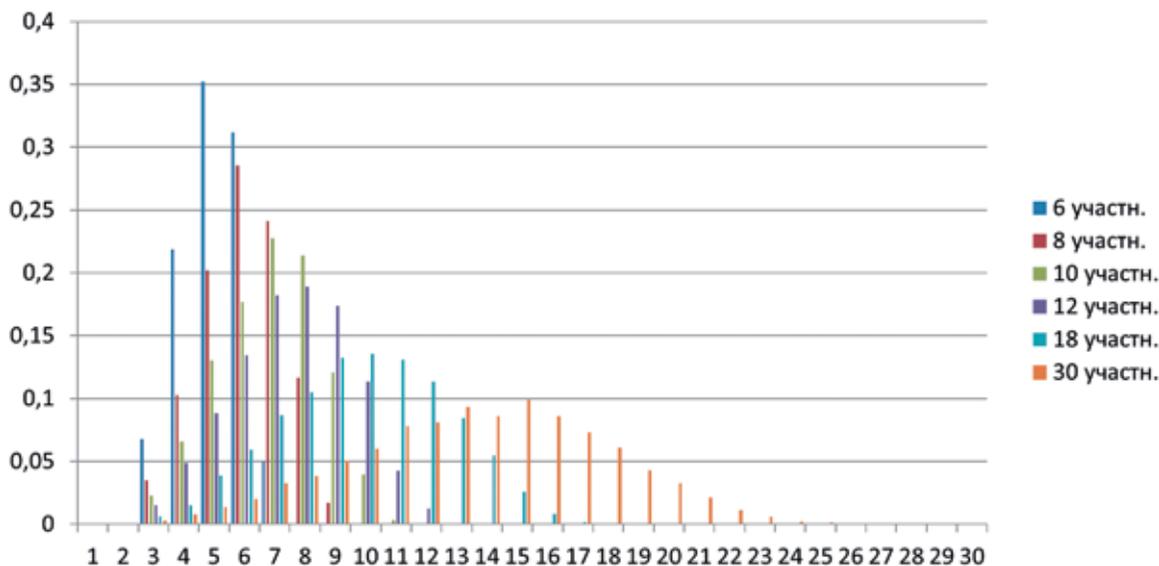


Рис. 7. Относительная частота возникновения частичного отказа РЭС для разных количеств отказавших линий для схем с различным количеством участников сети.

Полученные результаты показывают, что предлагаемое определенное усложнение структурных решений в кластерных распределенных энергетических сетях для энергоснабжения автономных потребителей приводит к увеличению их ЭБ.

Табл. 3. Характеристики РЭС, с оценкой влияния масштабирования на устойчивость к отказам линий электропередач.

Номер схемы РЭС	Количество участников	Количество линий электропередач	Среднее значение количества отказавших линий до первого частичного отказа
1	6	9	5,04
2	8	12	6,01
3	10	15	6,86
4	12	18	7,63
5	18	27	9,81
6	30	45	13,62

Заключение

Использование вычислительного эксперимента и результатов моделирования надежности при энергоснабжении потребителей, в аспектах прогнозирования вероятностных индикаторов отказов оборудования и элементов кластерных энергетических сетей, выявления их последствий для ЭБ жизнедеятельности малонаселенных и труднодоступных дислокаций, закладывает основу для управления качеством энергетической сети. При этом открывается перспектива в дальнейшем включать в модель дополнительные причины и исходные события для изучения фактов отказов, превентивных мер, важных для противоаварийной устойчивости сети. Например, такие причины, как неравномерность процессов генерации с использованием возобновляемых источников, конечность запаса топлива для традиционных источников генерации, надежность работы персонала энергетической сети. Предложенный подход позволяет верифицировать перспективные новые проектные решения по будущему проектному облику энергетической сети, например, включить в состав РЭС системы накопления и хранения энергии, являющиеся в различные периоды как «генератором», так и «потребителем». Имитационное моделирование процессов поведения РЭС представляет практический интерес и важно для повышения их потребительского качества, противоаварийной устойчивости к опасному воздействию от окружающего мира.

Библиографический список

1. Научно-технические проблемы освоения Арктики / ред. Лаверов Н.П., Васильев В.И., Макоско А.А. М.: Наука, 2015. 490 с.
2. Татаркин А.И. Современная парадигма освоения и развития арктической зоны Российской Федерации. В кн.: Научно-технические проблемы освоения Арктики. М.: Наука, 2015. С307-334

3. 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(78). С. 92-103.

4. Формирование стратегических приоритетов изучения и комплексного освоения арктических территорий Российской Федерации / под ред. А.И. Татаркина. Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН, 2013. 374 с.

5. Смоленцев Д.О. Развитие энергетики Арктики: проблемы и возможности малой генерации // Арктика: экология и экономика. 2012. № 3(7). С. 22-30

6. 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.

7. Глотов В.И., Тутнов А.И. Система мониторинга факторов экономического, технического, правового и иного вида рисков для энергетической безопасности отдельно взятого региона РФ // Труды Вольного экономического общества России. 2009. Т. 130. С. 78-87.

8. Иванова И.Ю., Тугузова Т.Ф., Халгаева Н.А. Развитие систем энергоснабжения изолированных и труднодоступных потребителей. В кн.: Восточный вектор энергетической стратегии России: современное состояние, взгляд в будущее. Под ред. Н.И. Воропая, Б.Г. Санеева. Новосибирск: Изд-во Гео, 2011, С. 207-235.

9. Ершов Г.А., Семериков В.Н., Семериков Н.В. О системе стандартов «Надежность в технике» // Стандарты и качество. 2018. № 8. С. 14-19.

10. Tselepis S. 12 years operation of the Gaidouromantra microgrid in Kythnos island , COI-3869 12 years operation of the Gaidouromantra microgrid in Kythnos island stathis Tselepis centre for renewable energy sources and saving. 2014.

11. IEA (2022), Smart Grids, IEA Paris, 2022. URL: <https://www.iea.org/reports/smart-grids> (дата обращения 15.01.2024 г.)

12. Богатырев Л.Л., Бочегов А.В., Воропай Н.И. Надежность топливо- и энергоснабжения и живучесть систем энергетики регионов России. Екатеринбург, Изд-во Уральского университета, 2003. 392 с.

13. Алымов С.В., Ильинский А.А. Методические вопросы учета нетрадиционных источников углеводородов в перспективном топливно- энергетическом балансе // Газовая промышленность. 2012. № 5. Спец. выпуск «Нетрадиционные ресурсы нефти и газа». С. 14-17.

14. Соболев А.В., Тутнов И.А., Украинцев В.Ф. Оценка показателей надежности персонала при длительной эксплуатации энергоблока атомной станции // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2020. № 1. С. 5-14.

15. Григорьев С.А., Григорьев А.С., Кулешов Н.В., Фатеев, В.Н. «Энергоустановка с когенерацией электричества и тепла на основе возобновляемых источников энергии и электрохимических водородных систем» // Теплоэнергетика. 2015. № 2. С. 3-9.

16. Карасевич В.А. Перспективы использования накопителей энергии в системах энергоснабжения предприятий добычи и транспортировки углеводородов // Наука и техника в газовой промышленности. 2018. № 4. С. 91-98.

References

1. Lavernov N.P., Vasiliev V.I., Makosko A.A., editors. [The scientific and engineering challenges of Arctic development]. Moscow: Nauka; 2015. (in Russ.)

2. Tatarkin A.I. [The modern paradigm of exploration and development of the Arctic zone of the Russian Federation]. In: [The scientific and engineering challenges of Arctic development]. Moscow: Nauka; 2015. Pp. 307-334. (in Russ.)

3. Grigoriev 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]. *Science and Technology in the Gas Industry* 2019;2(78):92-103. (in Russ.)

4. Tatarkin A.I., editor. [Defining strategic priorities for the exploration and comprehensive development of the Arctic territories of the Russian Federation]. Yekaterinburg: Institute of Economics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2013. (in Russ.)

5. Smolentsev D.O. [Development of power systems in the Arctic: challenges and opportunities of small-scale generation]. *Arctic: Ecology and Economy* 2012;3(7):22-30. (in Russ.)

6. Voropay N.I., Marchenko O.V., Stennikov V.A. [Challenges of regional energy supply in Russia's energy strategy until 2030 and prospects of low-power nuclear power plants]. *Atomic Energy* 2011;111(5):262-268. (in Russ.)

7. Glotov V.I., Tutnov A.I. [System for monitoring factors of economic, technological, legal and other types of risks for the energy security of a particular region of the Russian Federation]. [*Proceedings of the Free Economic Society of Russia*] 2009;130:78-87. (in Russ.)

8. Ivanova I.Yu., Tuguzova T.F., Khalgaeva N.A. [Development of energy supply systems of isolated and hard-to-reach consumers]. In: Voropay N.I., Saneev B.G. [The Eastern Vector of Russia's Energy Strategy: the current state, a look into the future]. Novosibirsk: Geo Publishing; 2011. Pp. 207-235. (in Russ.)

9. Yershov G.A., Semerikov V.N., Semerikov N.V. [On the Reliability in technology system of standards]. *Standards and quality* 2018;8:14-19. (in Russ.)

10. Tselepis S. 12 years operation of the Gaidouromantra microgrid in Kythnos island, COI-3869. Tselepis centre for renewable energy sources and saving; 2014.

11. IEA (2022), Smart Grids. IEA Paris; 2022. (accessed 15.01.2024). Available at: <https://www.iea.org/reports/smart-grids>

12. Bogatyrev L.L., Bochegov A.V., Voropay N.I. [Reliability of fuel and energy supply and survivability of energy systems in Russian regions]. Yekaterinburg: Ural State University Publishing; 2003. (in Russ.)

13. Alymov S.V., Ilyinsky A.A. [Methodological issues of accounting for unconventional hydrocarbon sources in the future fuel and energy balance]. *Gas Industry* 2012;5:14-17. (in Russ.)

14. Sobolev A.V., Tutnov I.A., Ukraintsev V.F. Estimation of the personnel reliability indicators during long-term operation of a nuclear power plant unit. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika* 2020;1:5-14.

15. Grigoriev S.A., Grigoriev A.S., Kuleshov N.V., Fateev V.N. [A power plant with cogeneration of electricity and heat based on renewable energy sources and electrochemical hydrogen systems]. *Teploenergetika* 2015;2:3-9. (in Russ.)

16. Karasevich V.A. [Potential for the use of energy storage devices in energy supply systems of enterprises producing and transporting hydrocarbons]. *Nauka i tekhnika v gazovoy promyshlennosti* 2018;4:91-98. (in Russ.)

Сведения об авторах

Григорьев Александр Сергеевич – кандидат технических наук, начальник отдела, НИЦ «Курчатовский институт», Площадь Академика Курчатова, д. 1, Москва, Российская Федерация, 123182, e-mail: Grigoriev_AS@nrcki.ru

Маколкин Дмитрий Владимирович – начальник группы, НИЦ «Курчатовский институт», Площадь Академика Курчатова, д. 1, Москва, Российская Федерация, 123182, e-mail: Makolkin_DV@nrcki.ru

Тутнов Игорь Александрович – доктор технических наук, профессор, начальник лаборатории исследования старения и продления ресурса ЯЭУ НИЦ «Курчатовский институт», Площадь Академика Курчатова д. 1, Москва, Российская Федерация. 123182, e-mail: Tutnov_IA@nrcki.ru

About the author

Alexander S. Grigoriev, Candidate of Engineering, Head of Department, National Research Center “Kurchatov Institute”, 1 Akademika Kurchatova Sq., 1, Moscow, Russian Federation, 123182, e-mail: Grigoriev_AS@nrcki.ru

Dmitry V. Makolkin, Head of Group, National Research Center “Kurchatov Institute”, 1 Akademika Kurchatova Sq., 1, Moscow, Russian Federation, 123182, e-mail: Makolkin_DV@nrcki.ru

Igor A. Tutnov, Doctor of Engineering, Professor, Head of the Laboratory for Research on Aging and Life Extension of Nuclear Power Plants, National Research Center “Kurchatov Institute”, 1 Akademika Kurchatova Sq., Moscow, Russian Federation, 123182, e-mail: Tutnov_IA@nrcki.ru

Вклад авторов

Григорьев А.С. Формирование сценариев и разработка моделей надежности энергоснабжении автономных потребителей.

Маколкин Д.В. Разработал методику и выполнил расчеты надежности энергоснабжении автономных потребителей.

Тутнов И.А. Оформление целостности статьи. Формирование метода, критериев, алгоритма расчета надежности энергоснабжении автономных потребителей.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов