

УДК 519.873+621.311

DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.009

Интеграция стохастических «генераторов погоды» в структурно-параметрическую оптимизацию микросетей

Еделев Алексей Владимирович^{1,3}, Карамов Дмитрий Николаевич^{2,3}, Башарина Ольга Юрьевна^{3,4}, Огородников Василий Александрович⁵, Каргаполова Нина Александровна⁵, Акентьева Марина Сергеевна⁵

¹Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
Россия, Иркутск, *flower@isem.irk.ru*

²Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Россия, Иркутск

³Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН,
Россия, Иркутск

⁴Уральский государственный экономический университет,
Россия, Екатеринбург

⁵Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
Россия, Новосибирск

Аннотация. В данной работе предпринята попытка разработки комплексного подхода к структурно-параметрической оптимизации микросетей с учётом воздействия различных возмущений. Представленная многоуровневая схема оптимизации позволяет лицам, принимающим решения, за приемлемое время получить целый спектр альтернативных перспективных конфигураций микросети, обеспечивающих устойчивое и бесперебойное энергоснабжение потребителей в заданных неблагоприятных условиях. Стохастические «генераторы погоды» в данной схеме необходимы для формирования временных рядов природно-климатических данных разной длительности, близких к реальным в заданном географическом положении, при проверке эффективности промежуточных и окончательных результатов расчёта.

Ключевые слова: микросеть, живучесть, надёжность, предметно-ориентированная среда, стохастические генераторы погоды

Цитирование: Еделев А.В. Интеграция стохастических «генераторов погоды» в структурно-параметрическую оптимизацию микросетей / А.В. Еделев, Д.Н. Карамов, О.Ю. Башарина, В.А. Огородников, Н.А. Каргаполова, М.С. Акентьева // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2024. – № 4(36) – С. 85-97 – DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.009.

Введение. Устойчивое, бесперебойное энергоснабжение потребителей при воздействии возмущений обеспечивается такими системными свойствами энергетических комплексов (ЭК), как гибкость, надёжность и живучесть, в зависимости от критичности воздействия исследуемых возмущений на системную производительность [1]. Гибкость характеризует возможности ЭК по диверсификации (взаимозаменяемости) энергоресурсов и их источников. Надёжность имеет дело с мелкими и средними возмущениями, которые система сама без внешней помощи может поглотить и компенсировать их последствия. Живучесть определяет способность системы адаптироваться и восстанавливаться при воздействии следующих классов крупных возмущений:

- стихийные бедствия, такие, как ураганы, наводнения, землетрясения, резкие похолодания и т.д.;
- техногенные катастрофы вследствие износа оборудования, ошибок персонала и т.д.;
- преднамеренные (умышленные) нарушения, такие, как кибератаки и т.д.

Микросети являются ЭК локального уровня, в которых совместное использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) с традиционными источниками и накопителями является экономически эффективным способом энергоснабжения потребителей. Особую значимость и большое распространение ВИЭ получили при электрификации

труднодоступных территорий, не имеющих связи с внешней электроэнергетической системой. Исходя из возможностей обеспечивать бесперебойное энергоснабжение, микросети можно разделить на следующие типы: практически автономные, полностью автономные и зависящие от подключения к внешним системам энергоснабжения.

Изменчивый характер работы ВИЭ и изолированность автономных микросетей [2] повышает значимость исследования вышеуказанных системных свойств ЭК, которые обычно строятся на проведении масштабных вычислительных экспериментов [3]. В работе [4] обсуждаются расширенные возможности, которые предоставляет цифровой двойник микросети для исследования живучести. Так, например, наличие у цифрового двойника обратной связи с объектом или его физической моделью (рис. 1) позволяет гибко подстраивать управление моделируемым объектом во время крупных возмущений и после их окончания.



Рис. 1. Цифровой двойник микросети

Для организации и проведения исследования системных свойств микросети цифровой двойник использует одну или несколько предметно-ориентированных сред (ПОС). Под ПОС понимается совокупность программно-аппаратных средств, позволяющих её конечным пользователям решать один или несколько определённых классов задач некоторой предметной области (рис. 1). В состав ПОС входят:

- распределённые пакеты прикладных программ (РППП), отвечающие за решение определённого класса задач;
- средства создания автоматизированных рабочих мест, которые позволяют исследователю работать с исходными данными, взаимодействовать с РППП, анализировать результаты вычислительных экспериментов.

В работе [5] представлена архитектура ПОС для исследования живучести и разработана методика оценки живучести микросети. Эта методика применяется в представленной в данной статье схеме структурно-параметрической оптимизации микросети для повышения её живучести в долгосрочной перспективе. Помимо этого, также обсуждается решение проблем, вызванных высокой вычислительной сложностью данной схемы, с помощью стохастических «генераторов погоды».

Проблемы структурно-параметрической оптимизации микросетей. Двухуровневая организация планирования решений о развитии и функционировании микросетей в задаче их структурно-параметрической оптимизации показана на рис. 2. На верхнем уровне принимаются решения об инвестициях в оборудование и его размещении, в то время как на нижнем уровне определяются оптимальные режимы работы выбранного оборудования [6]. Решения по развитию и функционированию микросетей принимаются согласованно. Вычислительная сложность задачи структурно-параметрической оптимизации возрастает снизу вверх [7].

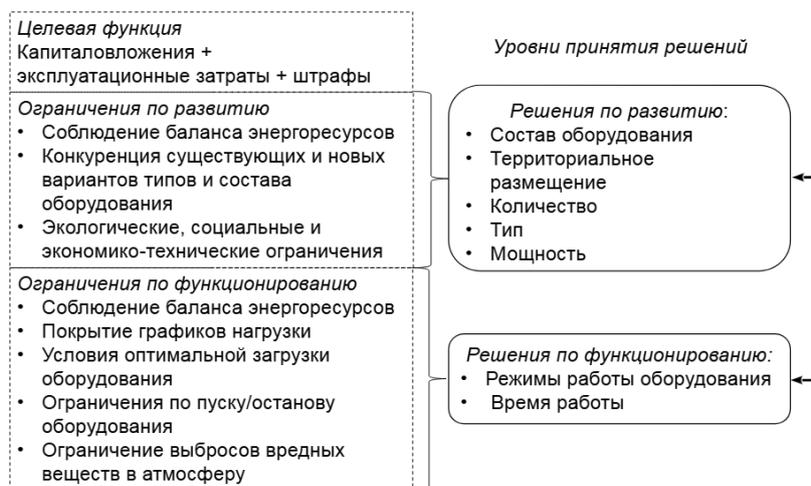


Рис. 2. Задача структурно-параметрической оптимизации микросети

Первая проблема, связанная с рассматриваемыми в этой статье микросетями, заключается в высокой вычислительной сложности их структурно-параметрической оптимизации. Такая сложность объясняется, с одной стороны, большой избыточностью различных вариантов типов и состава оборудования, необходимой для обеспечения гибкости в долгосрочной перспективе (верхний уровень на рис. 2), с другой стороны – высокой степенью пространственно-временной детализации условий функционирования системы для адекватного представления взаимодействия ВИЭ с прочими источниками и накопителями энергии в краткосрочной перспективе (нижний уровень на рис. 2) [8]. Для задания природно-климатических условий часто применяется копирование интервалов данных типичного метеорологического года [9-11].

Вторая проблема заключается в необходимости проверки эффективности промежуточных и окончательных решений структурно-параметрической оптимизации микросетей [12] в условиях различных возмущений с требуемой степенью пространственно-временной детализации. Во-первых, имитируемые условия должны быть правдоподобными и близкими к реальным. Во-вторых, условия должны различаться и составлять некоторое множество для проведения тщательного тестирования.

Первая из вышеописанных проблем имеет более глобальный характер, чем вторая, и она решается путём достижения компромисса между имеющиеся в наличии вычислительными ресурсами, приемлемым временем расчёта, точностью его результатов и факторами,

определяющими вычислительную сложность структурно-параметрической оптимизации конкретной микросети. К таким факторам относятся [13, 14]:

- детализация внутренних и внешних условий функционирования;
- экономические и технологические аспекты моделирования;
- математическая сложность модели микросети.

В зарубежной литературе решению первой проблемы (“computational tractability”) в последнее время уделяется пристальное внимание [15]. Например, для воздействия на вышеперечисленные факторы предлагается множество различных способов, которые можно условно разделить на модельные и технические [16]. Модельные способы просты в реализации и добиваются снижения времени расчётов в основном за счёт упрощения моделирования микросети, что негативно отражается на точности результатов и снижает их практическую значимость. Технические способы ускоряют вычисления и уменьшают время расчётов без потери точности, но гораздо более трудоёмки в реализации.

Для решения второй из вышеописанных проблем в литературе имеется мало работ [17-19], применимых к микросетям и гарантирующих бесперебойность энергоснабжения потребителей при воздействии возмущений. Основным недостатком таких работ является привязка к возмущениям определённой критичности. Авторам данной статьи не известно о существовании комплексного подхода к структурно-параметрической оптимизации микросетей с учётом воздействия различных возмущений. Ниже предлагается такой подход на основе существующей схемы исследования живучести ЭК с использованием стохастических «генераторов погоды».

Исследование живучести ЭК. Отправной точкой в исследовании живучести ЭК является модель функционирования и развития, которую можно записать в следующем общем виде [13]:

$$\min_x C(X), \quad (1)$$

$$g(X) \leq 0, \quad (2)$$

$$h(X) = 0, \quad (3)$$

где C – функция экономических затрат на функционирование и развитие ЭК, $X = \{x^0, x^1, \dots, x^{n_t}\}$ – искомая последовательность состояний ЭК, x^t – вектор параметров ЭК, описывающий его состояние $x \in X$ в интервал $t = \overline{0, \dots, n_t}$. Неравенства g в (2) и равенства h_j в (3) представляют разнообразные требования к функционированию и развитию ЭК.

Переход к фактическому исследованию живучести происходит путём добавления в модель (1)-(3) множества сценариев крупных возмущений V и вектора критериев живучести F :

$$\max_{i=\overline{1, n_v}} \min_{X \in S(v_i)} [C(X, v_i), F(X, v_i)]^T, \quad (4)$$

где n_v – число возмущений в множестве V , S – множество допустимых планов распределения потоков энергоресурсов, определяемое ограничениями (2) и (3) в условиях реализации крупного возмущения v_i .

Постановка (4) в целом описывает класс задач анализа уязвимости ЭК [20]. Главной целью этого класса является выявление явных и, самое главное, скрытых дефектов в территориально-производственной структуре системы и механизмах её управления. Целевая функция в (4) стремится найти наиболее значимые дефекты, сценарии использования которых остаются во множестве V и передаются в качестве исходных данных в задачи следующих классов.

Расширение постановки (4) приводит к классу задач структурно-параметрической оптимизации ЭК с целью повышения его живучести, иначе говоря – оптимизации живучести [21]:

$$\min_{j=1, n_w} \max_{i=1, n_v} \min_{X \in S(v_i, w_j)} [C(X, v_i, w_j), F(X, v_i, w_j)]^T, \quad (5)$$

где W – избыточное множество мер по повышению живучести, деактивированных в исходной конфигурации ЭК, w_j – вектор двоичных переменных, ненулевые компоненты которого активируют соответствующие меры по повышению живучести, n_w – общее число комбинаций мер из множества W . Целевая функция в (5) стремится выбрать наиболее эффективные сочетания мер по повышению живучести из множества при реализации наихудшего возмущения из заданного множества V .

Основное отличие постановки (5) от (4) заключается в переносе фокуса с возмущения на его последствия для ЭК при моделировании V [22]. В постановке (5) допускается, что для нахождения максимального ущерба системе достаточно моделировать гипотетического противника вместо реального источника возмущений. Это допущение делается, исходя из предположения, что для реального ЭК смягчение и устранение последствий крупного возмущения куда важнее рассмотрения его природы, приводящей к тяжелым последствиям вплоть до коллапса системы. Воображаемый противник обладает полными сведениями о системе, точно оценивает собственные возможности и достаточно изощрён, чтобы использовать знания о обнаруженных дефектах для планирования атак на систему. Целью атак является причинение максимального ущерба системе. Такое допущение делается для снижения вычислительной сложности задач оптимизации живучести (5).

Перечисленные выше математические постановки образуют этапы формализованной схемы, согласно которой построение исследования живучести ЭК имеет итеративный характер. Подобная схема даёт возможность взглянуть на структуру исследования живучести ЭК сверху и правильно классифицировать задачи данной предметной области, решаемые соответствующими РППП (рис. 3).

РППП для анализа уязвимости ЭК в целом отвечает за формирование представительного множества крупных возмущений, которые в полной мере должны отражать возможности источника возмущений причинить максимальный ущерб производительности моделируемой ЭК. Исходными данными для РППП для анализа уязвимости являются конфигурации ЭК и сводные метрики (рис. 3).

Понятие конфигурации в целом представляет собой определённый вариант территориально-производственной структуры ЭК, который включает в себя описание объектов энергетики и временные ряды данных, описывающих природно-климатические, социальные, экономические и прочие условия функционирования и развития этих объектов.

Сводные метрики отражают в количественном виде изменение состояния ЭК во времени и характеризуют системные возможности адаптации к воздействию крупных возмущений и восстановлению после их окончания.

Исходными данными для РППП для оптимизации живучести ЭК (рис. 3) являются сводные метрики, избыточное множество мероприятий по повышению живучести, сформированное на базе одной из конфигурации ЭК, и множество крупных возмущений, полученное в результате анализа уязвимости заданной конфигурации ЭК. Как говорилось выше, в задачах оптимизации живучести ЭК акцент делается не на природе источника возмущений, а на величине и масштабе последствий возмущения для системы. Поэтому сценарий крупного возмущения моделирует групповой отказ k из n наименее защищённых (критических) элементов системы. Отказ любого из n критических элементов сам по себе

вызывает тяжкие последствия для системы. Размер k зависит от ресурсных ограничений, наложенных на источник возмущений [22].

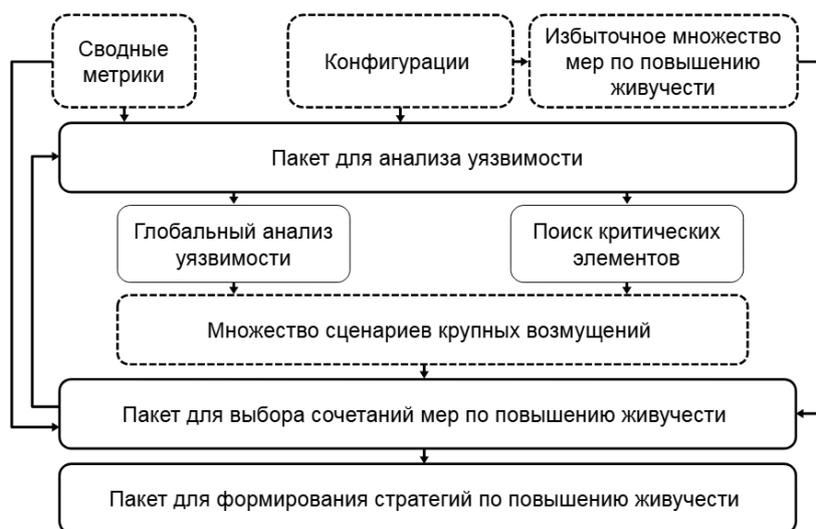


Рис. 3. Схема исследования живучести ЭЖ

На выходе РППП для оптимизации живучести ЭЖ выдаёт эффективные комбинации мер, которые обеспечивают ЭЖ максимальную живучесть в условиях функционирования и развития, создаваемых заданным множеством крупных возмущений. Получив такие комбинации мер для нескольких разнородных множеств крупных возмущений, далее можно провести их многокритериальный анализ и построить стратегии повышения живучести ЭЖ, которые определяют порядок и время реализации отобранных комбинаций. Пакет для формирования стратегий по повышению живучести (см. рис. 3) на основе динамического программирования в виде многоэтапного процесса принятия решений позволяет выполнить эту задачу.

Стохастические «генераторы погоды». Во второй половине XX века начал активно развиваться стохастический подход к моделированию и исследованию метеорологических и климатических процессов. Стохастические модели, построенные на основе входных данных различных типов (данных срочных метеонаблюдений, осредненных данных наблюдений, данных реанализа и т. п.), позволяют моделировать метеорологические процессы с заданным временным и/или пространственным разрешением. В литературе стохастические модели метеопроцессов часто называют стохастическими «генераторами погоды» (СГП). По своей сути, СГП представляют стохастические модели и соответствующие им пакеты программ, позволяющие численно моделировать длинные ряды случайных чисел, обладающих статистическими свойствами, повторяющими основные свойства реальных метеорологических рядов и полей [23, 24].

В зависимости от решаемой задачи моделируются либо значения отдельных метеопараметров и их комплексов (приземной температуры воздуха, количества осадков, относительной влажности воздуха, модуля и направления скорости ветра и др.), либо их некоторые специальные характеристики (индикаторы наличия / отсутствия осадков, минимальная и максимальная за сутки температура и т.п.). СГП допускают моделирование метеопроцессов с различным временным шагом (например, месячные, суточные, трёхчасовые, часовые или минутные).

Об актуальности разработки стохастических СГП, их теоретической и практической значимости свидетельствует то, что в настоящее время такие математические модели активно

используются для решения задач в различных областях науки, в том числе для долгосрочного проектирования микросетей [19].

Следует отметить, что численное стохастическое моделирование метеорологических процессов часто является чрезвычайно трудоёмкой задачей (особенно, если моделируются комплексы метеопараметров, как функции временных и пространственных координат).

В данной работе СГП, в частности, нужны для моделирования в заданной пространственной точке следующих важных для микросетей природно-климатических параметров [25]:

- приземной температуры воздуха (графики потребления тепла и электроэнергии);
- модуля скорости ветра (выработка электроэнергии ветроэлектрическими установками);
- облачности (выработка электроэнергии солнечными панелями).

Место СГП в схеме структурно-параметрической оптимизации микросетей. В основе общей схемы структурно-параметрической оптимизации микросетей (рис. 4) лежит синхронизация верхнего и нижнего уровней, моделирующих развитие и функционирование системы (рис. 2). Средний уровень схемы отражает специфику исследования живучести ЭК (рис. 3) и, согласно постановке (4), отвечает за оценку бесперебойности энергоснабжения потребителей при воздействии возмущений преимущественно метеорологического характера. Именно такие природные возмущения оказывают основное влияние на надёжность и живучесть локальных ЭК.

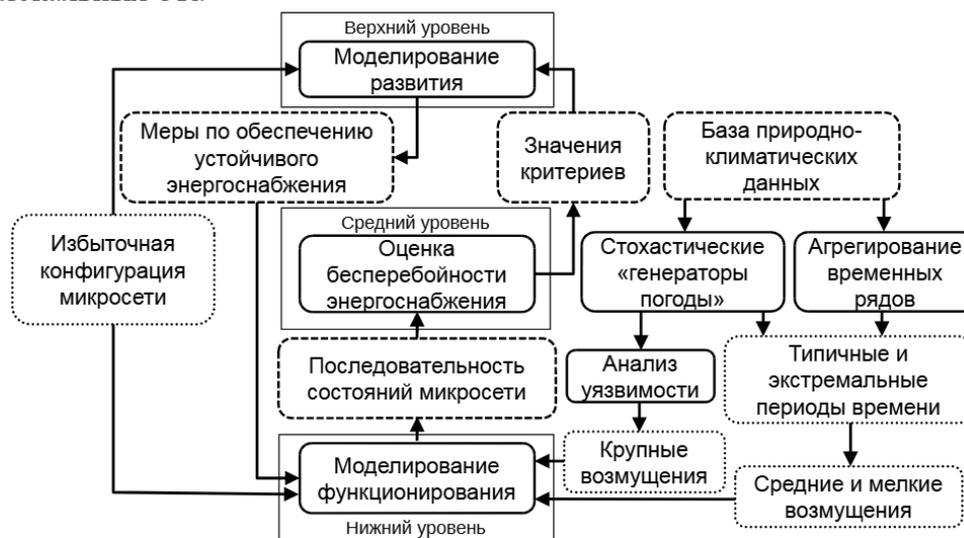


Рис. 4. Схема оптимизации живучести ЭК

На вход схемы структурно-параметрической оптимизации микросетей подаётся избыточная конфигурация микросети с деактивированными мерами по обеспечению устойчивого энергоснабжения W и множеством возмущений V . На верхнем уровне схемы численный метод поиска оптимальных решений, выбранный в результате предварительного тестирования [21], формирует вектор w_j , который определяет сочетание типов и единиц различного технологического оборудования, мест его установки. Вектор w_j передается на нижний уровень, где решается задача нахождения оптимальных режимов работы выбранного оборудования в условиях возмущений, заданных V . Результаты расчёта передаются на средний уровень для выполнения процедуры оценки бесперебойности энергоснабжения [5]. Далее рассчитанные значения критериев C и F , характеризующие эффективность сочетания мер w_j , возвращаются обратно на верхний уровень для коррекции направления оптимизации в сторону повышения надёжности или живучести микросети.

Множество V , согласно постановке (4), состоит из крупных возмущений, которые формируются в результате предварительно проведённого анализа уязвимости микросети. В настоящее время основным недостатком РППП для анализа уязвимости ЭК является отсутствие возможности рассмотрения стихийных бедствий метеорологического характера, таких, как тропический шторм, ураганный ветер, похолодание, снежная буря и засуха. Для моделирования метеорологических крупных возмущений необходимы:

- графики уязвимости компонентов микросети, которые определяют вероятность их выхода из строя в зависимости от уровня интенсивности стихийного бедствия;
- модель стихийного бедствия, которая должна уметь рассчитывать его интенсивность в определённый момент времени и в заданной точке пространства.

Типовой график уязвимости компонента показан на рис. 5, где x обозначает параметр стихийного бедствия, $p(x)$ – вероятность отказа компонента, x_1 – интенсивность стихийного бедствия, начиная с которой вероятность отказа компонента начинает возрастать, x_2 представляет собой значение параметра стихийного бедствия, при котором однозначно происходит отказ компонента, т.е. $p(x_2) = 1$ [26].



Рис. 5. Типовой график уязвимости компоненты микросети

Для моделирования стихийных бедствий метеорологического характера планируется использовать СГП. Вместе со средствами агрегирования временных рядов планируется применять СГП для построения сценариев средних и мелких возмущений, так как схема на рис. 4 касается исследования не только живучести, но и надёжности микросетей. Для исследования надёжности важно, чтобы сценарии возмущений наряду с «типичными» или «репрезентативными» периодами времени, представляющими наиболее характерные природно-климатические условия функционирования микросетей, также содержали «экстремальные» периоды, представляющие ухудшения погодных условий [18].

Размер множества V , включающего в себя, помимо крупных, также средние и мелкие возмущения, следует добавить в вышеприведённый список факторы, определяющие вычислительную сложность структурно-параметрической оптимизации микросетей. Управление размером V относится к модельным способам балансировки вычислительной сложности, и для компенсации их основного недостатка, описанного выше, требуется анализ чувствительности результатов структурно-параметрической оптимизации [12]. Последнее основано на массовом тестировании результатов оптимизации на дополнительном множестве возмущений, сформированном с помощью СГП. Здесь стоит отметить, что типичный метеорологический год не содержит «экстремальных» периодов, поэтому многократное дублирование его интервалов не позволяет провести качественный анализ чувствительности результатов оптимизации [19].

Заключение. Цифровые двойники упрощают планирование, первоначальную эксплуатацию оборудования, обучение персонала и техническое обслуживание, поэтому их использование в энергетике должно стать основным инструментом для структурно-

параметрической оптимизации микросетей и тестирования энергетического оборудования. При проектировании и реконструкции микросетей цифровые двойники могут быть использованы для оценки устойчивости и бесперебойности энергоснабжения потребителей в условиях воздействия различных возмущений. Это особенно актуально для автономных микросетей, широко использующих ВИЭ для энергоснабжения труднодоступных территорий.

В настоящее время в литературе нет работ, посвященных комплексному подходу к структурно-параметрической оптимизации микросетей с учётом воздействия различных возмущений. Это вызвано большой вычислительной сложностью таких задач, которая, в частности, обусловлена необходимостью высокой степени детализации условий функционирования микросетей для адекватного представления взаимодействия ВИЭ с прочими источниками и накопителями энергии.

В данной работе предпринята попытка разработки такого комплексного подхода на основе существующей схемы исследования живучести ЭК. Представленная многоуровневая схема структурно-параметрической оптимизации позволяет лицам, принимающим решения, за приемлемое время получить целый спектр альтернативных перспективных конфигураций микросети, обеспечивающих устойчивое и бесперебойное энергоснабжение потребителей в заданных неблагоприятных условиях. Эти конфигурации могут быть далее проанализированы с учетом дополнительных неформализованных знаний о конкретной системе. Стохастические «генераторы погоды» в данной схеме необходимы для формирования временных рядов природно-климатических данных разной длительности, близких к реальным в заданном географическом положении, при проверке эффективности промежуточных и окончательных результатов расчёта.

Благодарности. Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»), рег. № 124052100088-3).

Список источников

1. Надежность систем энергетики и их оборудования. В 4-х томах. Т. 1. Справочник по общим моделям анализа и синтеза надежности систем энергетики / ред. Ю.Н. Руденко. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 480 с.
2. Карамов Д.Н. Интеграция процесса категоризации электрохимических накопителей энергии в задачу оптимизации состава оборудования автономных энергетических комплексов, использующих возобновляемые источники энергии / Д.Н. Карамов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2019. – Т. 330. – № 5. – С. 113-130.
3. Bychkov I.V., Gorsky S.A., Edelev A.V. et al. Support for managing the resilience of energy systems based on a combinatorial approach. *Journal of computer and systems sciences international*, 2021, vol. 60, no. 6. pp. 981-994, DOI:10.1134/S1064230721060071.
4. Еделев А.В. Моделирование автономной микросети / А.В. Еделев, Д.Н. Карамов, О.Ю. Башарина // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2023. – № 3(31). – С.74-85. – DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.007.
5. Еделев А.В. Методика оценки живучести автономной микросети / А.В. Еделев, Д.Н. Карамов, О.Ю. Башарина // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2023. – № 4(32). – С.117-126. – DOI:10.25729/ESI.2023.32.4.010.
6. Wang L., Yang Z., Sharma S. et al. A review of evaluation, optimization and synthesis of energy systems: methodology and application to thermal power plants. *Energies*, 2018, vol. 12(1), p.73.
7. Bahl B., Hennen M., Lampe M. et al. Optimization-based synthesis of resource-efficient utility systems. Resource efficiency of processing plants: monitoring and improvement, 2018, pp. 373-401.
8. Deng X., Lv T. Power system planning with increasing variable renewable energy: a review of optimization models. *Journal of cleaner production*, 2020, 246, p.118962.

9. Карамов Д.Н. Формирование исходных метеорологических массивов с использованием многолетних рядов fm 12 Synop и metar в системных энергетических исследованиях / Д.Н. Карамов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2018. –Т. 329. – № 1. – С. 69-88.
10. Svoboda V., Wenzl H., Kaiser R. et al. Operating conditions of batteries in off-grid renewable energy systems. Solar energy, 2007, vol. 81, pp. 1409-1425.
11. Kostromin R., Feoktistov A., Voskoboinikov M. Service-oriented tools for automating digital twin development. Proceedings of the 4th Scientific-practical workshop on information technologies: algorithms, models, systems (ITAMS 2021), CEUR-WS Proceedings, 2021, vol. 2984, pp. 95-100, DOI: 10.47350/ITAMS.2021.12.
12. Bistline J., Blanford G., Mai T., Merrick J. Modeling variable renewable energy and storage in the power sector. Energy policy, 2021, vol. 156, p.112424.
13. Иерархическое моделирование систем энергетики / отв.ред. Н.И. Воропай, В.А. Стенников. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2020. – 314 с.
14. Hoffmann M., Schyska B.U., Bartels J. et al. A review of mixed-integer linear formulations for framework-based energy system models. Advances in applied energy, 2024, p.100190.
15. Bröchin M., Pickering B., Tröndle T. et al. Harder, better, faster, stronger: understanding and improving the tractability of large energy system models. Energy, sustainability and society, 2024, vol. 14, no. 1, p. 27, DOI:10.1186/s13705-024-00458-z.
16. Cao K.K., Von KrbeK K., Wetzel M. et al. Classification and evaluation of concepts for improving the performance of applied energy system optimization models. Energies, 2019, vol. 12, no. 24, p. 4656.
17. Pfetsch M.E., Schmitt A. A generic optimization framework for resilient systems. Optimization methods and software, 2023, vol. 38, no. 2, pp.356-385.
18. Castelli A.F., Pilotti L., Monchieri A., Martelli E. Optimal design of aggregated energy systems with (n-1) reliability: MILP models and decomposition algorithms. Applied energy, 2024, vol. 356, p. 122002.
19. Ailliot P., Boutigny M., Koutroulis E., et al. Stochastic weather generator for the design and reliability evaluation of desalination systems with renewable energy sources. Renewable energy, 2020, vol. 158, pp. 541-553.
20. Еделев А.В. Анализ уязвимости автономных микросетей / А.В. Еделев, Д.Н. Карамов, О.Ю. Башарина // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2024. – № 1(33). – С. 112-121. – DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.010.
21. Еделев А.В. Методика выбора алгоритмов оптимизации живучести энергетических инфраструктур / А.В. Еделев, Н.М. Береснева, Р.О. Костромин // Системы анализа и обработки данных, 2023. – №4(92). – С.97-129.
22. Alderson D.L., Brown G.G., Carlyle W.M. Assessing and improving operational resilience of critical infrastructures and other systems. Tutorials in operations research: bridging data and decisions (INFORMS, Catonsville, MD), 2014, pp. 180-215.
23. Ailliot P., Allard D., Monbet V., Naveau P. Stochastic weather generators: an overview of weather type models. Journal de la société française de statistique, 2015, vol. 156, no. 1, pp. 101-113.
24. Mehan S., Guo T., Gitau M.W., Flanagan D.C. Comparative study of different stochastic weather generators for long-term climate data simulation. Climate, 2017, vol. 5, p. 26.
25. Akenteva M.S., Kargapolova N.A., Ogorodnikov V.A. Development of a numerical stochastic model of joint spatio-temporal fields of weather parameters for the south part of the Baikal natural territory. Russian journal of numerical analysis and mathematical modelling, 2022, vol. 37, no.2, pp.73-83.
26. Panteli M., Mancarella P., Trakas D.N. et al. Metrics and quantification of operational and infrastructure resilience in power systems. IEEE Transactions on power systems, 2017, vol. 32, no. 6, pp. 4732-4742.

Еделев Алексей Владимирович. К.т.н., старший научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева. Область научных интересов – живучесть энергетических комплексов, математическое моделирование, распределенные вычисления, flower@isem.irk.ru, AuthorID: 710350, SPIN: 8447-9522, ORCID: 0000-0003-2219-9754.

Карамов Дмитрий Николаевич. К.т.н., доцент, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Байкальский институт БРИКС. Область научных интересов – энергетические системы и комплексы, возобновляемые источники энергии, математическое моделирование, dmitriy.kararov@mail.ru., AuthorID: 905773, SPIN: 9977-1303, ORCID: 0000-0001-5360-4826.

Башарина Ольга Юрьевна. К.т.н., доцент, научный сотрудник Института динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, доцент Уральского государственного экономического университета. Область научных интересов – системный анализ и моделирование сложных систем, basharinaolga@mail.ru, AuthorID: 702499, SPIN: 2612-2891, ORCID: 0000-0002-7151-782X.

Огородников Василий Александрович. Д.ф.-м.н., главный научный сотрудник Института вычислительной математики и математической геофизики. Область научных интересов – вычислительная математика, стохастическое моделирование природных процессов, *ova@osmf.sscs.ru*, AuthorID: 8406, SPIN: 8765-8560, ORCID: 0000-0001-6205-0220.

Каргаполова Нина Александровна. Д.ф.-м.н., заведующий лабораторией Института вычислительной математики и математической геофизики. Область научных интересов – вычислительная математика, стохастическое моделирование природных процессов, *nkargapolova@gmail.com*, AuthorID: 949493, SPIN: 1447-0760, ORCID: 0000-0002-1598-7675.

Акентьева Марина Сергеевна. Младший научный сотрудник Института вычислительной математики и математической геофизики. Область научных интересов – методы Монте-Карло, математическое моделирование природных явлений, *akenteva@sscs.ru*, AuthorID: 1264179, SPIN: 9853-0648.

UDC 519.873+621.311

DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.009

The integration of stochastic weather generators into the design of microgrids

Alexey V. Edelev¹, Dmitriy N. Karamov², Olga Yu. Basharina^{3,4}, Vasily A. Ogorodnikov⁵,
Nina A. Kargapolova⁵, Marina S. Akenteva⁵

¹Melentiev energy systems institute SB RAS,
Russia, Irkutsk, *flower@isem.irk.ru*

²National research irkutsk state technical university,
Russia, Irkutsk

³Matrosov institute for system dynamics and control theory of SB RAS,
Russia, Irkutsk

⁴Ural state university of economics,
Russia, Yekaterinburg

⁵Institute of computational mathematics and mathematical geophysics SB RAS,
Russia, Novosibirsk

Abstract. The objective of this paper is to develop an integrated approach to structural and parametric optimization of microgrids, taking into account the impact of various disruptions. The proposed multi-level optimization framework enables decision-makers to identify a range of promising microgrid designs within an acceptable timeframe, thereby ensuring a stable and continuous power supply to users under specified adverse conditions. In this framework, stochastic "weather generators" are crucial for generating time series of natural and climate data with varying durations that closely resemble real-world values in a given geographic location. This is done for the purpose of evaluating the effectiveness of intermediate and final computational results.

Keywords: microgrid, resilience, reliability, subject-oriented environment, stochastic weather generators

Acknowledgements: The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, the grant No. 075-15-2024-533 for implementation of Major scientific projects on priority areas of scientific and technological development (the project "Fundamental research of the Baikal natural territory based on a system of interconnected basic methods, models, neural networks and a digital platform for environmental monitoring of the environment").

References

1. Nadezhnost' sistem energetiki i ikh oborudovaniya [Reliability of energy systems and their equipment], vol. 1. Ed Rudenko Yu.N., Moscow, Energoatomizdat, 1994, 480 p.
2. Karamov D.N. Integratsiya protsessov kategorizatsii elektrokhimicheskikh istochnikov energii v unikal'nom sostave oborudovaniya avtonomnykh energeticheskikh kompleksov, ispol'zuyushchikh istochniki energii [Integration of the storage battery categorization process into the task of optimizing the equipment of stand-alone energy systems with renewable energy sources]. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets engineering], 2019, v. 330, no. 5, pp. 113-130.

3. Bychkov I.V., Gorsky S.A., Edelev A.V. et al. Support for managing the resilience of energy systems based on a combinatorial approach. *Journal of computer and systems sciences international*, 2021, vol. 60, no. 6. pp. 981-994, DOI:10.1134/S1064230721060071.
4. Edelev A.V., Karamov D.N., Basharina O.Yu. Modelirovaniye avtonomnoy mikroseti [Modelling autonomous microgrids]. *Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and mathematical technologies in science and management], 2023, no. 3(31), pp.74-85, DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.007.
5. Edelev A.V., Karamov D.N., Basharina O.Yu. Metodika otsenki zhivuchesti avtonomnoy mikroseti [Methodology for assessing the resilience of an autonomous microgrid]. *Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and mathematical technologies in science and management], 2023, no. 4(32), pp.117-126, DOI:10.25729/ESI.2023.32.4.010.
6. Wang L., Yang Z., Sharma S. et al. A review of evaluation, optimization and synthesis of energy systems: methodology and application to thermal power plants. *Energies*, 2018, vol. 12(1), p.73.
7. Bahl B., Hennen M., Lampe M. et al. Optimization-based synthesis of resource-efficient utility systems. *Resource efficiency of processing plants: monitoring and improvement*, 2018, pp. 373-401.
8. Deng X., Lv T. Power system planning with increasing variable renewable energy: a review of optimization models. *Journal of cleaner production*, 2020, 246, p.118962.
9. Karamov D.N. Formirovaniye iskhodnykh meteorologicheskikh massivov s ispol'zovaniyem mnogoletnikh ryadov fm 12 Synop i metar v sistemnykh energeticheskikh proizvodstvakh [Formation of initial meteorological arrays using long-term series fm 12 Synop and metar in system energy studies]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering], 2018, v. 329, no. 1, pp. 69-88.
10. Svoboda V., Wenzl H., Kaiser R. et al. Operating conditions of batteries in off-grid renewable energy systems. *Solar energy*, 2007, vol. 81, pp. 1409-1425.
11. Kostromin R., Feoktistov A., Voskoboinikov M. Service-oriented tools for automating digital twin development. *Proceedings of the 4th Scientific-practical workshop on information technologies: algorithms, models, systems (ITAMS 2021), CEUR-WS Proceedings*, 2021, vol. 2984, pp. 95-100, DOI: 10.47350/ITAMS.2021.12.
12. Bistline J., Blanford G., Mai T., Merrick J. Modeling variable renewable energy and storage in the power sector. *Energy policy*, 2021, vol. 156, p.112424.
13. Iyerarkhicheskoye modelirovaniye sistem ustoychivosti [Hierarchical modeling of energy systems]. Eds. N.I. Voropay, V.A. Stennikov. *Novosibirsk, Akademicheskoye izd-vo "Geo"* [Novosibirsk: Academic Publishing House "Geo"], 2020, 314 p.
14. Hoffmann M., Schyska B.U., Bartels J. et al. A review of mixed-integer linear formulations for framework-based energy system models. *Advances in applied energy*, 2024, p.100190.
15. Bröchin M., Pickering B., Tröndle T. et al. Harder, better, faster, stronger: understanding and improving the tractability of large energy system models. *Energy, sustainability and society*, 2024, vol. 14, no. 1, p. 27, DOI:10.1186/s13705-024-00458-z.
16. Cao K.K., Von KrbeK K., Wetzel M. et al. Classification and evaluation of concepts for improving the performance of applied energy system optimization models. *Energies*, 2019, vol. 12, no. 24, p. 4656.
17. Pfetsch M.E., Schmitt A. A generic optimization framework for resilient systems. *Optimization methods and software*, 2023, vol. 38, no. 2, pp.356-385.
18. Castelli A.F., Pilotti L., Monchieri A., Martelli E. Optimal design of aggregated energy systems with (n-1) reliability: MILP models and decomposition algorithms. *Applied energy*, 2024, vol. 356, p. 122002.
19. Ailliot P., Boutigny M., Koutroulis E., et al. Stochastic weather generator for the design and reliability evaluation of desalination systems with renewable energy sources. *Renewable energy*, 2020, vol. 158, pp. 541-553.
20. Edelev A.V., Karamov D.N., Basharina O.Yu. Analiz uyazvimosti avtonomnykh mikrosetey [Vulnerability analysis of autonomous microgrids]. *Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and mathematical technologies in science and management], 2024, no. 1(33), pp. 112-121, DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.010.
21. Edelev A.V., Beresneva N.M., Kostromin R.O. Metodika vybora algoritmov optimizatsii zhivuchesti energeticheskikh infrastruktur [Methodology for selecting algorithms for optimizing the survivability of energy infrastructures]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh* [Data analysis and processing systems], 2023, no 4(92), pp. 97-129.
22. Alderson D.L., Brown G.G., Carlyle W.M. Assessing and improving operational resilience of critical infrastructures and other systems. *Tutorials in operations research: bridging data and decisions (INFORMS, Catonsville, MD)*, 2014, pp. 180-215.
23. Ailliot P., Allard D., Monbet V., Naveau P. Stochastic weather generators: an overview of weather type models. *Journal de la société française de statistique*, 2015, vol. 156, no. 1, pp. 101-113.

24. Mehan S., Guo T., Gitau M.W., Flanagan D.C. Comparative study of different stochastic weather generators for long-term climate data simulation. *Climate*, 2017, vol. 5, p. 26.
25. Akenteva M.S., Kargapolova N.A., Ogorodnikov V.A. Development of a numerical stochastic model of joint spatio-temporal fields of weather parameters for the south part of the Baikal natural territory. *Russian journal of numerical analysis and mathematical modelling*, 2022, vol. 37, no.2, pp.73-83.
26. Panteli M., Mancarella P., Trakas D.N. et al. Metrics and quantification of operational and infrastructure resilience in power systems. *IEEE Transactions on power systems*, 2017, vol. 32, no. 6, pp. 4732-4742.

Edelev Alexey Vladimirovich. Candidate of Technical Sciences, Researcher, Melentiev energy systems institute. The main direction of research – resilience of energy systems, mathematical modeling, distributed computing, flower@isem.irk.ru, AuthorID: 710350, SPIN: 8447-9522, ORCID: 0000-0003-2219-9754.

Karamov Dmitriy Nikolaevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, National research irkutsk state technical university, Baikal School of BRICS. The main direction of research - energy systems and power engineering complexes, renewable energy sources, mathematical modelling, dmitriy.karamov@mail.ru, AuthorID: 905773, SPIN: 9977-1303, ORCID: 0000-0001-5360-4826.

Basharina Olga Yurievna. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Researcher at the Matrosov institute for system dynamics and control theory of SB RAS, Ural state university of economics. The main direction of research - system analysis and modeling of complex systems, basharinaolga@mail.ru, AuthorID: 702499, SPIN: 2612-2891, ORCID: 0000-0002-7151-782X.

Ogorodnikov Vasily Aleksandrovich. Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Main researcher, Institute of computational mathematics and mathematical geophysics SB RAS. The main direction of research – Computational Mathematics, stochastic modelling of natural processes, ova@osmf.sccc.ru, AuthorID: 8406, SPIN: 8765-8560, ORCID: 0000-0001-6205-0220.

Kargapolova Nina Aleksandrovna. Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of laboratory, Institute of computational mathematics and mathematical geophysics SB RAS. The main direction of research – Computational Mathematics, stochastic modelling of natural processes, nkargapolova@gmail.com, AuthorID: 949493, SPIN: 1447-0760, ORCID: 0000-0002-1598-7675.

Akenteva Marina Sergeevna. Junior researcher, Institute of computational mathematics and mathematical geophysics SB RAS. The main direction of research – Monte Carlo methods, mathematical simulation of natural phenomena, akenteva@sscc.ru, AuthorID: 1264179, SPIN: 9853-0648.

Статья поступила в редакцию 29.10.2024; одобрена после рецензирования 12.12.2024; принята к публикации 17.12.2024.

The article was submitted 10/29/2024; approved after reviewing 12/12/2024; accepted for publication 12/17/2024.