

Методика выбора алгоритмов оптимизации живучести энергетических инфраструктур*

А.В. ЕДЕЛЕВ^{1,a}, Н.М. БЕРЕСНЕВА^{1,b}, Р.О. КОСТРОМИН^{2,c}

¹ 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук

² 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 134, Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова Сибирского отделения Российской академии наук

^a flower@isem.irk.ru ^b beresneva@isem.irk.ru ^c kostromin@icc.ru

В статье рассматривается одна из самых сложных задач исследования живучести энергетических инфраструктур – нахождение эффективных комбинаций мер по повышению живучести. Для решения этой задачи в статье описывается подход, рассматривающий ее как проблему структурно-параметрической оптимизации энергетических инфраструктур, которая строится по двух- или трехуровневой схеме. Описанный в статье подход добавляет в середину вышеописанной схемы еще один слой, который производит проверку эффективности работы выбранного оборудования в экстремальных условиях, создаваемых заданным множеством крупных возмущений. Основным недостатком, наследуемым от структурно-параметрической оптимизации энергетических инфраструктур, является высокая вычислительная сложность многоуровневой оптимизационной схемы. В непоследнюю очередь неприемлемое время расчета может объясняться подбором неподходящих оптимизационных алгоритмов. В известных авторам работах, касающихся структурно-параметрической оптимизации энергетических инфраструктур, вопрос сравнения оптимизационных алгоритмов между собой явно не ставится. Поэтому в настоящей статье предлагается трехэтапная методика выбора алгоритмов оптимизации, по которой перед решением конкретной задачи оптимизации живучести энергетических инфраструктур сначала следует провести тестирование алгоритмов, а затем выбрать наилучший из них на основе многокритериального анализа результатов тестирования. Для применения методики необходимо разработать специальный облегченный вариант поставленной задачи оптимизации живучести и подготовить испытательный стенд (testbed) для организации и проведения тестовых вычислительных экспериментов. Применение методики продемонстрировано на примере выбора эвристических методов поиска оптимальных решений из библиотеки PaGMO, используемых на наружном уровне схемы оптимизации живучести системы газоснабжения Европы. Всего было протестировано пять популярных эволюционных алгоритмов, наиболее подходящим из которых оказался генетический алгоритм сортировки без доминирования NSGA-II.

* Статья получена 30 августа 2023 г.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00460.

Ключевые слова: системы энергетики, энергетические комплексы, живучесть, математическая модель, оптимизационные алгоритмы, многокритериальный анализ, предметно ориентированная среда, испытательный стенд

ВВЕДЕНИЕ

Энергетические инфраструктуры (ЭИ) предназначены для добычи (производства, получения), переработки (преобразования), передачи (транспортирования), хранения и распределения энергоресурсов и снабжения ими потребителей [1]. Они относятся к критическим инфраструктурам, под которыми понимаются системы, нарушение функционирования которых отрицательно влияет на экономику государства и благополучие общества [2].

В основе функционирования и развития ЭИ лежат требования надежности, позволяющие данным системам справляться с уже известными возмущениями, вероятность возникновения которых высока, а по масштабу последствий их можно характеризовать как мелкие и средние. Однако в настоящее время резко вырос интерес к исследованию способности ЭИ выживать при столкновении с крупными возмущениями [3], вероятность возникновения которых весьма мала или достоверно неизвестна, а их воздействие может привести к тому, что ЭИ без дополнительных мер не сможет далее выполнять возложенные на нее функции. При этом изучается реакция ЭИ на наступление таких экстремальных условий, последствия для потребителей, компенсация нежелательных последствий [4] и процесс восстановления системы [5].

Способность ЭИ противостоять крупным возмущениям, не допуская их каскадного развития с массовым нарушением режима энергоснабжения потребителей [6], и восстанавливать исходное состояние объекта или близкое к нему называется живучестью [7, 8]. Главной целью исследования живучести является построение стратегий управления развитием и функционирования ЭИ, которые позволяют эффективно адаптироваться к крупным возмущениям и восстанавливаться после них.

Исследование живучести строится на анализе поведения ЭИ в экстремальных условиях функционирования. Поведение ЭИ в таких условиях описывают кривые живучести, каждая из которых является графиком зависимости какого-либо показателя системной производительности P от времени t (рис. 1). В кривой живучести с момента t_0 до момента t_1 система находится в исходном стабильном состоянии, которое характеризуется уровнем производительности P_2 . Крупное возмущение возникает в момент t_1 . Система сопротивляется процессу деградации, сначала пытаясь поглотить возмущение, а затем противодействует ему. В момент t_2 возмущение заканчивается падением системной производительности до значения P_0 . В период от t_2 до t_3 система приспособляется к последствиям. Начиная с момента t_3 система стремится в кратчайшие сроки восстановить свою производительность. В момент t_4 процесс восстановления заканчивается, и система приходит в новое стабильное состояние. Далее она продолжает медленно увеличивать свою производительность до одного из приемлемых уровней P_1 , P_2 или P_3 в момент T [9–11].

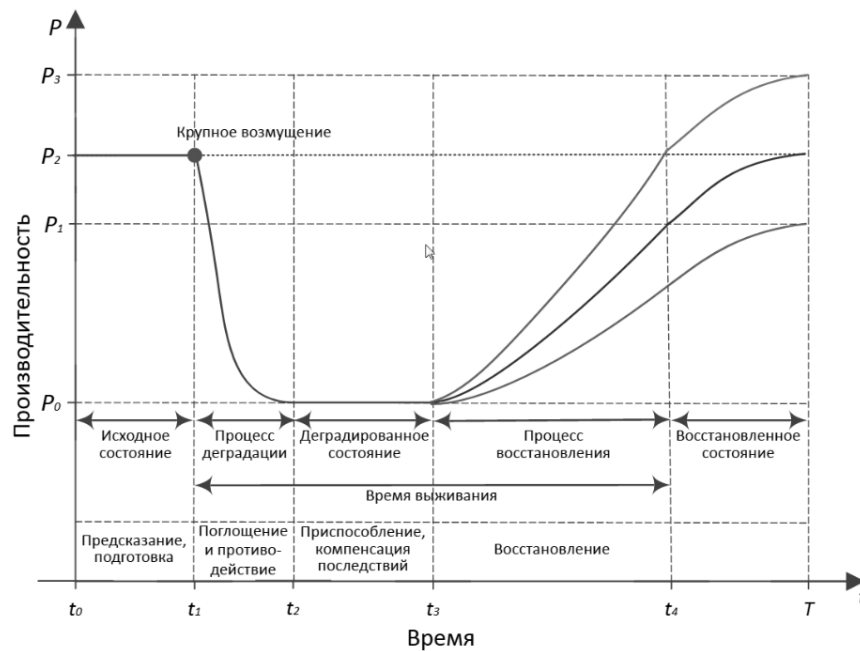


Рис. 1. Идеализированная кривая живучести энергетической инфраструктуры

Fig. 1. The idealized resilience curve of an energy infrastructure

В формализованном виде конфигурация ЭИ описывается вектором x , в состав которого входят структурные и режимные параметры объектов энергетики, а также природно-климатические, социальные, экономические и прочие параметры, представляющие условия внешней среды. Последовательность $X = \{x^0, x^1, \dots, x^T\}$ в этом случае обозначает состояния ЭИ x^t в моменты времени $t = 0, \dots, T$, а показатель производительности P является функцией $P(t): X \rightarrow R$, преобразующей x^t в скалярную величину. Поведение ЭИ на интервале времени выживания (рис. 1) характеризуется сводной метрикой $D: P \rightarrow R$, которая сворачивает определенный участок кривой живучести в скалярную величину [12]. В табл. 1 приведены сводные метрики [12, 13]. Например, интегральная характеристика живучести R рассчитывает нормализованную величину непокрытой нагрузки ЭИ на протяжении всего времени выживания. Значения данной метрики лежат в пределах отрезка $[0, 1]$, где 0 представляет абсолютно неживучую систему, а 1 — полностью живучую систему [14].

Если показатели производительности отражают по большей части технологические или территориальные особенности ЭИ, то сводные метрики характеризуют в количественном виде стороны живучести [15], отражающие различные временные этапы поведения ЭИ в экстремальных условиях функционирования: планирование, сопротивление, подстройку и восстановление.

Планирование характеризует способность ЭИ предсказывать крупные возмущения и готовиться к ним на интервале времени (t_0, t_1) кривой живучести (рис. 1). Сопротивление представляет способность ЭИ поглощать заморо-

дающееся возмущение и далее противостоять ему на интервале (t_1, t_2) . Подстройка характеризует способность ЭИ приспособиться к изменениям, вызванным воздействием возмущения, и компенсировать его последствия на интервале (t_2, t_3) . Восстановление характеризует быстроту, с которой ЭИ может вернуться к выполнению своих функций на заданном уровне на интервале времени (t_3, t_4) .

Таблица 1

Table 1

Сводные метрики для оценки живучести энергетических инфраструктур
Summary metrics to evaluate the resilience of energy infrastructures

Характеризуемая сторона живучести ЭИ	Название метрики	Формула
Сопротивление	Скорость падения производительности ЭИ	$\Phi = \frac{P(t_1) - P(t_2)}{t_2 - t_1}$
	Уязвимость ЭИ	$\Lambda = P(t_1) - P(t_2)$
Подстройка	Время приспособления ЭИ к последствиям крупного возмущения	$E = t_3 - t_2$
Восстановление	Скорость восстановления ЭИ	$\Pi = \frac{P(t_4) - P(t_3)}{t_4 - t_3}$
Вся живучесть	Интегральная характеристика живучести ЭИ	$R = \frac{\int_{t_1}^{t_4} P(t) dt}{P(t_1)(t_4 - t_1)}$

Организацией и проведением исследования живучести ЭИ занимается предметно ориентированная среда (ПОС), под которой понимается совокупность программно-аппаратных средств, позволяющих ее конечным пользователям решать один или несколько определенных классов задач некоторой предметной области [16, 17]. В состав ПОС входят:

- распределенные пакеты прикладных программ (РППП), отвечающие за решение определенного класса задач исследования живучести ЭИ [18];
- средства создания автоматизированных рабочих мест, которые позволяют исследователю работать с исходными данными, взаимодействовать с РППП, анализировать результаты вычислительных экспериментов [19].

Любой РППП, предназначенный для исследования живучести ЭИ, обеспечивает [20]:

- единые принципы взаимодействия с моделями ЭИ разных уровней территориально-отраслевой иерархии [21];
- механизм объединения различных моделей отдельных систем энергетики для исследования их совместной работы в экстремальных условиях;
- отображение крупных возмущений на модель ЭИ путем моделирования отказов и восстановлений отдельных элементов системы;

- разделение крупных возмущений по типу воздействия на структурные и функциональные;
- моделирование каскадного развития аварий, в том числе их распространения по взаимосвязанным системам.

В качестве примера РППП можно привести пакет для анализа уязвимости [22, 23]. Анализ уязвимости в целом отвечает за формирование представительного множества крупных возмущений, которые в полной мере должны отражать возможности источника возмущений причинить максимальный ущерб производительности моделируемой ЭИ. В исследовании живучести акцент делается не на природе источника, а на величине и масштабе последствий возмущения для ЭИ. Поэтому сценарий крупного возмущения обычно состоит из списка элементов ЭИ, групповой отказ которых вызовет наихудшие последствия для системы. Размер списка этих ключевых элементов зависит от ресурсных ограничений, наложенных на источник возмущений [24]. Целенаправленно сформированные списки ключевых элементов представляют собой куда большую опасность для ЭИ в плане последствий по сравнению со списками, составленными случайным образом. Более подробно конкретные задачи, решаемые с помощью РППП для анализа уязвимости ЭИ, представлены в [25].

На основе результатов, полученных с помощью РППП для анализа уязвимости, создается множество представительных сценариев крупных возмущений, которое является частью исходных данных для задач оптимизации живучести ЭИ. Их решение в целом заключается в следующем. Сначала исследователем составляется избыточный набор мер по повышению живучести. Затем на базе этого набора формируются эффективные комбинации мер, которые обеспечивают ЭИ максимальную живучесть в экстремальных условиях функционирования, создаваемых заданным множеством крупных возмущений. Сформировав такие комбинации мер для нескольких разнородных множеств крупных возмущений, далее можно проанализировать их и выделить инвариантные сочетания мер по повышению живучести ЭИ. Далее строятся стратегии повышения живучести ЭИ, которые определяют порядок и время реализации отобранных сочетаний инвариантных мер. Таким образом, по результатам решения задач живучести можно построить стратегии управления развитием и функционирования ЭИ, которые позволяют эффективно адаптироваться к крупным возмущениям различного, в том числе неизвестного, происхождения и наиболее быстрым путем восстанавливаться после их воздействия. Формированием таких стратегий занимается отдельный РППП [26], который рассматривает реализацию стратегий как многоэтапный процесс принятия решений на основе динамического программирования [27, 28].

Данная статья посвящена выбору наилучших алгоритмов оптимизации живучести ЭИ, которые формируют эффективные комбинации мер по повышению живучести для конкретного множества крупных возмущений.

1. ТРЕХУРОВНЕВАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЖИВУЧЕСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИНФРАСТРУКТУР

Меры по повышению живучести представляют собой избыточное множество структурных и функциональных дополнений сети ЭИ, вследствие чего выбор эффективных комбинаций мер можно в целом рассматривать

как проблему параметрической или структурно-параметрической оптимизации ЭИ [29].

Параметрическая оптимизация отвечает за выбор типоразмеров и числа единиц технологического оборудования, определение оптимальных параметров работы технологического оборудования для каждого временного шага. Однако больший вклад в улучшение характеристик ЭИ, снижение капитальных и эксплуатационных затрат вносит структурно-параметрическая оптимизация, отвечающая за подбор типов технологического оборудования и мест его установки.

Структурно-параметрическая оптимизация обычно формулируется поверх параметрической, в сравнении с которой является более сложной проблемой с математической и вычислительной точки зрения. Это выражается, в частности, в том, что пространство возможных топологических альтернатив для систем с такой высокой структурной и динамической сложностью, как ЭИ, может быть в принципе априори неизвестно [30]. Также математически доказано, что проблема структурно-параметрической оптимизации интегрированных систем энергетики является *NP*-трудной задачей [31].

Структурно-параметрическая оптимизация ЭИ выполняется по двух- или трехуровневой схеме, где на верхних уровнях происходит подбор типов технологического оборудования и мест его установки, выбор типоразмеров и числа единиц. Информация о выбранном оборудовании передается на нижний уровень, где производится оптимизация режимов работы ЭИ с учетом решений, принятых на верхних уровнях. Затем расчетные данные об эффективности выбранного оборудования возвращаются нижним уровнем обратно наверх.

В литературе представлено множество подходов к структурно-параметрической оптимизации ЭИ [32, 33]. Среди них можно выделить специализированные методы синтеза отдельных СЭ [34, 35].

Для связывания структурно-параметрической оптимизации ЭИ с исследованием живучести необходимо, чтобы найденные оптимальные изменения топологии и режимов работы конкретной ЭИ, полученные для нормальных условий функционирования и развития, проходили дополнительную проверку экстремальными условиями, например, в виде отказов элементов сети [36–38]. Здесь следует отметить, что большую эффективность имеет проверка экстремальными условиями не конечных, а промежуточных решений. Это позволяет своевременно корректировать направление поиска решений в сторону повышения живучести ЭИ. Такой механизм оценки живучести реализован в подходе к синтезу живучих ЭИ [39]. Также в качестве примера можно привести трехуровневые методы робастной оптимизации [40], у которых средний уровень отыскивает наихудшую по своим последствиям реализацию неопределенных условий. Однако встраивание оценки живучести в существующие известные пакеты математической оптимизации является весьма нетривиальной задачей [39].

Описанную выше многоуровневую схему структурно-параметрической оптимизации, направленную на повышение живучести ЭИ, можно формализовать следующим образом.

Пусть параметры из заранее подготовленного исследователем избыточного набора мер по повышению живучести хранятся в векторе w , а W обозна-

чает множество всевозможных комбинаций этих мер. Множество V , состоящее из сценариев представительных крупных возмущений, также формируется заранее на основе результатов анализа уязвимости. Выбор наиболее эффективных сочетаний мер по повышению живучести из множества W при реализации наихудшего возмущения из множества V может быть представлен в виде трех-уровневой общей математической постановки:

$$\min_{w \in W} \max_{v \in V} \min_{X \in Y(v, w)} [C(X, v, w), F(X, v, w)], \quad (1)$$

$$C(X, v, w) = \sum_{t=1}^T (cx^t + bs^t + hu^t), \quad (2)$$

$$F(X, v, w) = \sum_{t=1}^T \frac{z^t}{Z^t}, \quad (3)$$

$$s^{t-1} + Ax^t + Qu^t - Z^t - s^t = z^t, \quad (4)$$

$$x^t \leq D^t(v), \quad (5)$$

$$z^t \leq Z^t, \quad (6)$$

$$u^t \leq U^t(w), \quad (7)$$

$$s^t \leq S^t(v), \quad (8)$$

$$s^0 = S^0, \quad (9)$$

$$t = 1, \dots, T, \quad (10)$$

где x^t – искомый вектор, элементы которого характеризуют интенсивность применения технологических способов функционирования элементов ЭИ (добычи, переработки, преобразования и транспорта энергоресурсов); Y – множество допустимых планов распределения потоков энергоресурсов в условиях реализации возмущения v и мероприятий по повышению живучести w ; z^t – искомый вектор, элементы которого равны недопоставке отдельных видов энергоресурсов; Q – матрица, отражающая локализацию проведения мер по повышению живучести; u^t – искомый вектор, описывающий интенсивность мер по повышению живучести; s^t – искомый вектор, компоненты которого характеризуют объемы запасов топлива; A – матрица, описывающая технологии производства и передачи энергоресурсов, значения элементов которой зависят от воздействия возмущения v ; D^t – вектор, определяющий технически возможные интенсивности применения отдельных технологических и производственных способов, значения элементов которого зависят от воздействия возмущения v ; Z^t – вектор, элементы которого характеризуют

объемы потребностей в отдельных видах энергоресурсов; U^t – вектор, задающий пределы интенсивности проведения мер по повышению живучести; S^t – вектор, определяющий емкость хранилищ, значения элементов которого зависят от воздействия возмущения v ; c – вектор, элементы которого определяют удельные затраты по каждому технологическому способу функционирования элементов ЭИ; b – вектор удельных затрат на эксплуатацию хранилищ; h – вектор, задающий удельные затраты на подготовку и проведение мероприятий по повышению живучести.

Целевая функция (1) включает два вида критериев: экономические и живучести. Экономический критерий (2) отражает издержки, связанные с функционированием ЭИ, и затраты на меры по повышению живучести. Критерий живучести (3) оценивает ущерб от недопоставки энергоресурсов из-за воздействия возмущения v .

Для уравнения (4) из вектора состояния ЭИ x^t были преднамеренно выделены вектор недопоставки z^t для измерения последствий возмущения v и эффекта от мер по повышению живучести w , вектор запасов s^t для связывания соседних состояний из последовательности X .

Воздействие возмущения v реализуется векторами D^t , S^t в уравнениях (4) и (8) соответственно. Элементы D^t , S^t характеризуют снижение мощности различных компонентов ЭИ вследствие воздействия возмущения v .

Уровень необходимого снабжения потребителей отдельными видами энергоресурсов во время возмущения v и после него регулируется элементами Z^t в ограничении (6).

Технические ограничения мер по повышению живучести задаются в (7).

Уравнение (9) предполагает, что перед возникновением возмущения все хранилища имеют некоторый начальный запас энергоресурсов, описываемый вектором S_0 .

Оптимизационные процедуры в постановке (1)–(10) последовательно обмениваются между собой данными. Наружный уровень генерирует новую комбинацию мер по повышению живучести $w \in W$ и передает ее на средний уровень. На среднем уровне исходная конфигурация ЭИ подвергается воздействию возмущения $v \in V$ с одновременной активацией мер из комбинации w . Далее модифицированная конфигурация передается на внутренний уровень, где происходит расчет на модели ЭИ. Полученная в результате расчета последовательность состояний X возвращается на средний уровень, где на основе данных из X и v по критериям живучести F оценивается эффективность мер из комбинации w . Затем результаты оценки возвращаются на наружный уровень и учитываются при формировании следующей комбинации мер по повышению живучести ЭИ.

Процедура оценки эффективности мер по повышению живучести для расчета значений критериев F использует сводные метрики D (табл. 1), примененные к кривым живучести, которые извлекаются из последовательности состояний X . Например, критерий живучести (3) можно записать как $(1 - R)$, где R – интегральная характеристика живучести ЭИ из табл. 1. Показатели производительности, графиками которых являются извлекаемые из X кривые

живучести, должны в данном случае помочь оценить снижение прямых и косвенных ущербов вследствие уменьшения недопоставок энергоресурсов, снижение риска прекращения энергоснабжения ответственных потребителей, уменьшение социальных последствий и прочие эффекты от проведения мер по повышению живучести [41]. Разнородность показателей производительности и сводных метрик устраняется применением статической или динамической нормализации [12].

В трехуровневой постановке оптимизации живучести (1) должны учитываться особенности классификации и реализации мер по повышению живучести ЭИ. Например, на отрезке времени выживания (период $[t_1, t_4]$ на рис. 1) меры по повышению живучести делятся на два типа [1]:

- оперативные мероприятия в виде использования запасов, резервов производственных мощностей, резервных мобильных средств для поддержки жизненно важных функций ЭИ;
- долговременные мероприятия по восстановлению объектов ЭИ, непосредственно пострадавших от воздействия возмущения.

Сопротивление и подстройка ЭИ по отношению к заданному крупному возмущению зависит от времени введения и эффективности оперативных мероприятий, характеризуемых продолжительностью и требуемыми финансовыми, организационными, техническими и прочими ресурсами. Долговременные мероприятия активизируются с некоторого уровня живучести, достигнутого после использования всех оперативных мероприятий.

2. ТЕСТИРОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ОПТИМИЗАЦИИ ЖИВУЧЕСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИНФРАСТРУКТУР

При планировании повышения живучести ЭИ важно понимать, насколько быстро исследователь сможет получить несколько хороших приближенных решений задачи (1). Оперативность получения решений важна, потому что исследователю нужно сначала сформировать целый спектр альтернативных путей по повышению живучести изучаемой ЭИ [42], а затем необходимо проанализировать их с учетом дополнительных неформализуемых знаний об ЭИ [43]. Эта причина также обуславливает невысокую ценность единственного точного решения задачи (1), которое к тому же может быть получено недостаточно быстро вследствие высокой вычислительной сложности всех задач структурно-параметрической оптимизации ЭИ [44]. Помимо этого, согласно обсуждению в [45–47] вычислительная сложность конкретной задачи оптимизации живучести в значительной степени зависит от следующих особенностей:

- от уровня детализации энергетических процессов в модели ЭИ [21];
- размера сети ЭИ;
- размера избыточного множества мер по повышению живучести ЭИ.

Высокая вычислительная сложность класса задач оптимизации живучести, наличие математических пакетов и алгоритмов структурно-параметрической оптимизации ЭИ [45], которые можно приспособить под специфику предметной области, а также готовых алгоритмов оптимизации живучести ЭИ [39] приводят к идее предварительного тестирования оптимизационных алгоритмов перед решением конкретной задачи в постановке (1). Процедура тестиро-

вания может быть осуществлена при выполнении следующих предварительных условий:

- должен быть разработан тестовый вариант поставленной задачи оптимизации живучести;
- должны быть определены критерии, по которым будут оцениваться алгоритмы оптимизации живучести ЭИ;
- должна быть в наличии специализированная среда для организации и проведения тестовых вычислительных экспериментов.

Тестовый вариант конкретной задачи оптимизации живучести ЭИ отличается от оригинала тем, что стороны поставленной задачи, не затрагиваемые тестами, должны быть заданы облегченным образом. В частности, при тестировании наружного уровня схемы оптимизации живучести ЭИ множество реалистичных сценариев крупных возмущений V в среднем уровне может быть заменено одним возмущением $\hat{v}$, которое практически сложно реализуемо, но явно гарантирует наихудшие последствия для заданной конфигурации ЭИ. К примеру, отказ всех дуг в сети недостижим на практике, но по интегральной характеристике живучести R данная ЭИ будет абсолютно неживучей системой. Такое упрощение или идеализация сторон оригинальной задачи, не покрываемых тестами, делается для того, чтобы проведение тестовых вычислительных экспериментов уложилось в приемлемые временные сроки.

Критерии оценки алгоритмов оптимизации живучести ЭИ должны измерять ресурсоемкость и оперативность решения тестовой задачи, а также точность полученных результатов (табл. 2). Первые критерии характеризуют рациональность использования выделенных вычислительных ресурсов при наличии квот на них, вторые характеризует предметную область исследований.

Таблица 2

Table 2

Типовой состав критериев эффективности алгоритмов оптимизации живучести энергетических инфраструктур

Typical criteria of the effectiveness of algorithms optimizing the resilience of energy infrastructures

Группа критериев оценки эффективности алгоритмов	Типовые критерии эффективности	Источник данных для определения критериев эффективности	Способ определения критериев эффективности	Аспекты идентификации критериев эффективности
Функциональные	Характеристика производительности ЭИ	Модель ЭИ	Интегральная оценка дефицитов на анализируемом временном интервале	Категории потребителей. Территориальная принадлежность
	Скорость восстановления ЭИ	Модель ЭИ	Сравнение производительности ЭИ на этапе восстановления	Территориальный аспект. Категории потребителей. Тип мероприятий

Окончание табл. 2

End of the Tab. 2

Группа критериев оценки эффективности алгоритмов	Типовые критерии эффективности	Источник данных для определения критериев эффективности	Способ определения критериев эффективности	Аспекты идентификации критериев эффективности
Топологические	Топологическая эффективность сети ЭИ	Модель ЭИ	Сравнение топологических характеристик исходной и преобразованной конфигураций ЭИ	Тип элементов сети (узлы, дуги). Степень связанности элементов сети
Экономические	Ущерб от реализации нештатных ситуаций. Затраты на ввод мероприятий	Модель ЭИ	Интегральная оценка затрат на анализируемом временном интервале, учитывающая темпы активизации мероприятий	Территориальный аспект. Категории потребителей. Мероприятия по повышению живучести
Критерии вычислительной сложности	Время выбора наборов эффективных мероприятий	Системная часть РППП	Система мониторинга вычислительной среды	Архитектура узлов вычислительной среды

Перечень критериев эффективности мер по повышению живучести берется из тестовой задачи повышения живучести. Топологические и функциональные критерии оценивают эффективность мер по повышению живучести ЭИ, экономические – стоимостные затраты на реализацию этих мер. Топологические и функциональные критерии формируются на базе сводных показателей:

- как интегральная оценка показателей производительности по всему анализируемому временному периоду;
- как изменение показателей производительности между двумя временными срезами.

Топологические критерии определяют структурную уязвимость ЭИ по оценкам важности их объектов. Они эффективны в случае структурных изменений ЭИ на уровне отключений существующих либо ввода новых объектов инфраструктур. Функциональные критерии являются главным показателем живучести ЭИ. Они оценивают изменения производительности ЭИ, характеризуют потокораспределение внутри них на уровне потребителей энергоресурсов. Экономические критерии эффективности зависят от производительности ЭИ, фиксируют изменения удельных затрат в случае восстановления или введения в эксплуатацию объектов ЭИ.

Критерии вычислительной сложности алгоритмов характеризуют временные и вычислительные затраты на расчет и выбор мер по повышению живучести ЭИ. Данные критерии фиксируются в базе данных системы мониторинга испытательного стенда, который отвечает за организацию и проведение вычислительных экспериментов с тестовой задачей.

Испытательный стенд (или testbed) предназначен для решения следующих проблем:

- проблем предварительной отладки, тестирования и оценки точности работы алгоритмов научных приложений их разработчиками (специалистами из разных предметных областей);
- проблем определения степени работоспособности и эффективности выполнения композиций сервисов, реализующих разрабатываемые алгоритмы и процессы извлечения и передачи данных разных форматов из различных источников;
- проблем оценки качества и визуализации предметных данных.

Испытательный стенд ориентирован на специалистов предметной области, чья задача состоит в интеграции существующих моделей, РППП, веб-сервисов и различных источников данных в рамках ПОС для проведения научных экспериментов с последующим анализом их результатов, в том числе с применением различных средств визуализации данных. Отличительной особенностью стенда является поддержка сбора, хранения и обработки данных через соответствующий прикладной программный интерфейс (API) из баз данных и от контрольно-измерительного оборудования, размещенного на исследуемых объектах. Испытательный стенд инкапсулирует подготовку и конфигурирование ПОС, что позволяет непрограммирующим исследователям проводить эксперименты в вычислительной среде с существующими моделями, алгоритмами (и реализующими их модулями) из РППП. Типовая архитектура стенда представлена на рис. 2. Более подробное описание архитектуры стенда обсуждается в [48].

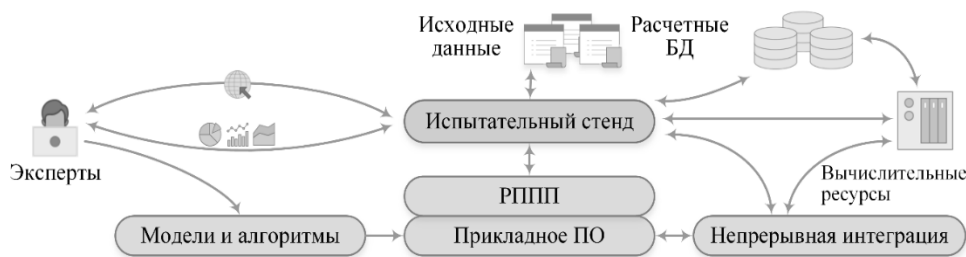


Рис. 2. Архитектура испытательного стенда

Fig. 2. The architecture of the testbed

Работа испытательного стенда строится следующим образом:

- в испытательный стенд выбираются модули (реализующие модели и алгоритмы) из РППП для проводимого эксперимента;
- выбираются узлы из доступных вычислительных ресурсов;
- размещаются исходные данные в виде набора файлов;
- указываются критерии оценки работы алгоритмов;
- из испытательного стенда запускается вычислительный эксперимент в пакетном режиме;
- средствами испытательного стенда осуществляется обращение к исходным кодам модулей из РППП, выполняется конфигурирование ресурсов и размещение исполняемых файлов на узлах в рамках непрерывной интеграции;

- по завершении вычислительного эксперимента результаты размещаются в расчетную БД для последующего анализа;
- при необходимости по заданным критериям автоматически выполнятся многокритериальный анализ результатов эксперимента, формируется результирующий отчет исследователю.

3. МЕТОДИКА ВЫБОРА АЛГОРИТМОВ ОПТИМИЗАЦИИ ЖИВУЧЕСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИНФРАСТРУКТУР

Задача выбора наилучших из тестируемых алгоритмов оптимизации живучести ЭИ может быть сформулирована следующим образом.

Пусть в наличии имеется I алгоритмов оптимизации живучести ЭИ. Каждый алгоритм с номером $i = \overline{1, I}$ оценивается K критериями и выдает на выходе M_i сочетаний мер по повышению живучести. Результатом оценки алгоритма i после решения тестовой задачи является матрица R_i размером в M_i строк и K столбцов.

Каждая матрица R_i преобразуется в вектор v_i с помощью операции агрегации f :

$$v_i = f(R_i). \quad (11)$$

Операция агрегации f в зависимости от принятой стратегии выбора алгоритмов (гарантированный или потенциально лучший результат) либо выбирает минимальное или максимальное значение для каждого критерия эффективности из соответствующего столбца матрицы R_i , либо проводит усреднение значений критерия. Собранные вместе векторы v_i формируют матрицу обобщенных оценок алгоритмов оптимизации живучести A размером в I строк и K столбцов.

Многокритериальный анализ матрицы A осуществляется одним или несколькими методами, подбираемыми:

- исходя из соответствия методов объективным характеристикам задачи выбора оптимизационных алгоритмов, к которым могут быть отнесены условия выбора методов (определенность, риск, неопределенность), целевая установка реализуемого выбора (поиск наилучшей альтернативы, ранжирование или классификация), конечность наборов методов, критериев их оценки;
- требований к вычислительной сложности методов, к их универсальности и уровню инструментальной поддержки;
- субъективных моментов задачи выбора оптимизационных алгоритмов, связанных с квалификацией и возможностями экспертов (способность работать с гибридными оценками, предпочтение порядковых шкал измерений, наличие временных ограничений).

Конечный выбор наиболее эффективных алгоритмов оптимизации живучести ЭИ осуществляется на экспертном уровне, исходя из дополнительного анализа следующих данных:

- последовательности состояний ЭИ, полученных в результате реализации найденных сочетаний мер по повышению живучести;

– устойчивости приоритетности оптимизационных алгоритмов в рамках различных методов их многокритериальной оценки;

– приоритетности алгоритмов в случае многотерриториальной оценки эффективности сочетаний мер по повышению живучести на базе различных наборов критериев F из постановки (1).

Предлагаемое выше решение задачи выбора наилучших алгоритмов оптимизации живучести ЭИ можно свести к следующей трехэтапной методике

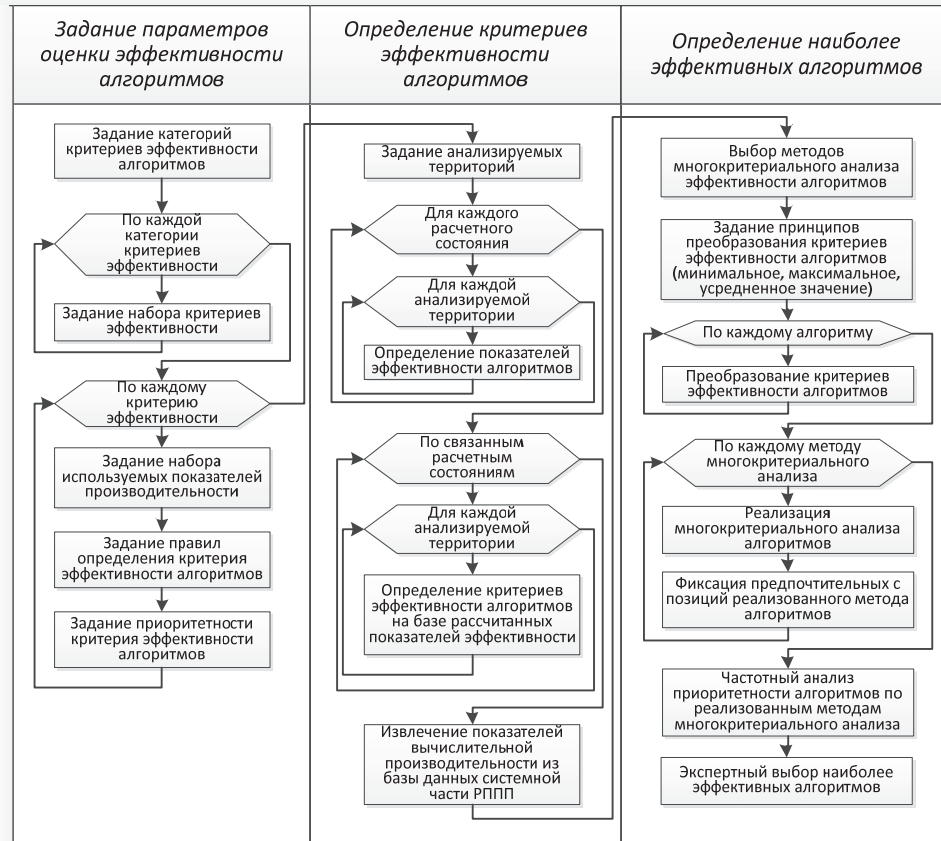


Рис. 3. Этапы выбора алгоритмов оптимизации живучести энергетических инфраструктур

Fig. 3. Stages of selecting algorithms for optimizing energy infrastructure resilience

На первом этапе этой методики формируются правила определения критериев эффективности мер по повышению живучести на базе показателей производительности, характеризующих технологические и экономические аспекты функционирования ЭИ, и сводных метрик, отражающих различные временные этапы поведения этих систем в экстремальных условиях функционирования.

В рамках второго этапа методики для результатов решения каждого оптимизационного алгоритма по выбранным территориям определяются значения критериев живучести F , фиксируются значения критериев рационального использования вычислительных ресурсов.

На последнем этапе методики происходит инструментальная (с помощью выбранных методов многокритериального анализа) оценка алгоритмов и последующий экспертный выбор алгоритмов оптимизации живучести ЭИ.

Выбор предпочтительных методов многокритериального анализа в методике регламентируется:

- соответствием методов объективным характеристикам решаемой задачи, к которым могут быть отнесены условия выбора методов (определенность, риск, неопределенность), целевой установкой реализуемого выбора (поиск наилучшей альтернативы, ранжирование или классификация), конечностью наборов методов, критериев их оценки;
- требованием к вычислительной сложности методов, к их универсальности и уровню инструментальной поддержки;
- субъективными моментами задачи выбора, связанными с квалификацией и возможностями экспертов (способность работать с гибридными оценками, предпочтение порядковых шкал измерений, наличие временных ограничений).

Апробация методики выбора алгоритмов оптимизации живучести ЭИ, построенных на базе библиотеки PaGMO, рассмотрена в следующих разделах статьи.

4. БИБЛИОТЕКА PaGMO

Численные методы поиска оптимальных решений, используемые на наружном уровне задачи оптимизация живучести ЭИ (1)–(10), можно разделить на две дополняющие друг друга группы: эвристические и оптимизационные [49]. Эвристические методы, как правило, эффективны для быстрого получения хороших решений. Однако эти методы не могут гарантировать оптимальности, главным образом, из-за последовательного характера и математически недоказанной сходимости. Оптимизационные методы, учитывающие структурные особенности ЭИ одновременно с конструктивными требованиями и режимными ограничениями, способны найти точное решение для практически любой целевой функции [50]. Обратной стороной этих преимуществ являются высокие вычислительные затраты и потенциально долгое время счета.

В связи с бурным развитием высокопроизводительных вычислений среди численных методов особый интерес вызывают те, которые могут ради ускорения расчетов каким-либо образом распараллеливать процесс структурно-параметрической оптимизации ЭИ.

В методах глобальной оптимизации эффективный параллелизм может быть достигнут прежде всего в методе мултистарта, который заключается в вызове стандартных локальных алгоритмов из множества точек, равномерно распределенных в пространстве поиска [51]. Локальная оптимизация в этом случае может выполняться в отдельных потоках, а сбор полученной информации о решениях и создание новых точек старта может выполняться на основном потоке [52].

Также в настоящее время для решения задач глобальной оптимизации активно развиваются методы, основанные на редукции исходной многомерной задачи к системе одномерных подзадач с последующим решением этих задач

методами оптимизации функций одной переменной [53]. Также существуют параллельные реализации этих методов [54, 55].

Среди эвристических методов хорошей степенью встроенного параллелизма обладают эволюционные алгоритмы [56]. Многопопуляционные эволюционные алгоритмы [57] основаны на так называемой островной парадигме кооперации [58]. Суть островной парадигмы заключается в том, что одна задача может параллельно решаться разными методами оптимизации в отдельных потоках-островах, которые асинхронно обмениваются друг с другом данными. Большую роль играет выбор структуры информационных потоков между различными островами, так как она определяет пути миграции лучших решений. Сочетание методов глобальной и локальной оптимизации позволяет обнаруживать глобальные экстремумы гладких и негладких целевых функций с разнообразного вида ограничениями [59]. Также островная парадигма естественным образом масштабируется [60].

В качестве примера можно привести библиотеку PaGMO (Parallel Global Multiobjective Optimiser), разработанную Европейским космическим агентством. В основе PaGMO лежит асинхронная обобщенная островная парадигма [61], которая выражается в наличии различных политик миграции данных между отдельными потоками. Также PaGMO содержит множество разнообразных численных методов поиска оптимальных решений. Некоторые из них, относящиеся к глобальной оптимизации, допускают или требуют применения методов локальной оптимизации.

Таким образом, перечисленные возможности PaGMO позволяют создавать вычислительные алгоритмы, у которых в каждом потоке-острове работает один или два численных метода поиска оптимальных решений.

Главным преимуществом таких библиотек, как PaGMO, является то, что они предоставляют унифицированный интерфейс для взаимодействия с имеющимися в наличии оптимизационными и эвристическими методами. Единжды реализованный программный код, использующий данный интерфейс, в дальнейшем не потребует модификации в следующих ситуациях:

- в случае смены текущего численного метода поиска оптимальных решений;
- при подключении новых методов, отсутствующих в библиотеке.

Сравнение PaGMO [62] с подобными современными библиотеками Evoh [63], Geneva [64] показывает, что, в отличие от них, PaGMO не поддерживает распределенные вычисления, так как в текущей версии библиотеки временно убрали поддержку протокола MPI. При этом PaGMO, в отличие от Evoh и Geneva, имеет больше реализаций биологических и эволюционных методов, таких как NSGA-II [65]. Также преимуществом PaGMO является то, что эта библиотека предоставляет унифицированный интерфейс не только к эвристическим методам, но и к пакетам математической оптимизации, таким как Iport [66], NLOpt [67] и Bonmin [68].

Реализация схемы оптимизации живучести ЭИ на основе вышеперечисленных возможностей библиотеки PaGMO выполнена в той части РППП для решения задач повышения живучести ЭИ (рис. 4), где располагается прикладное программное обеспечение (ПО). Внутренний уровень схемы оптимизации живучести ЭИ использует универсальный интерфейс обмена данными (API) с моделями ЭИ, реализованный на основе библиотеки графов LEMON [69].

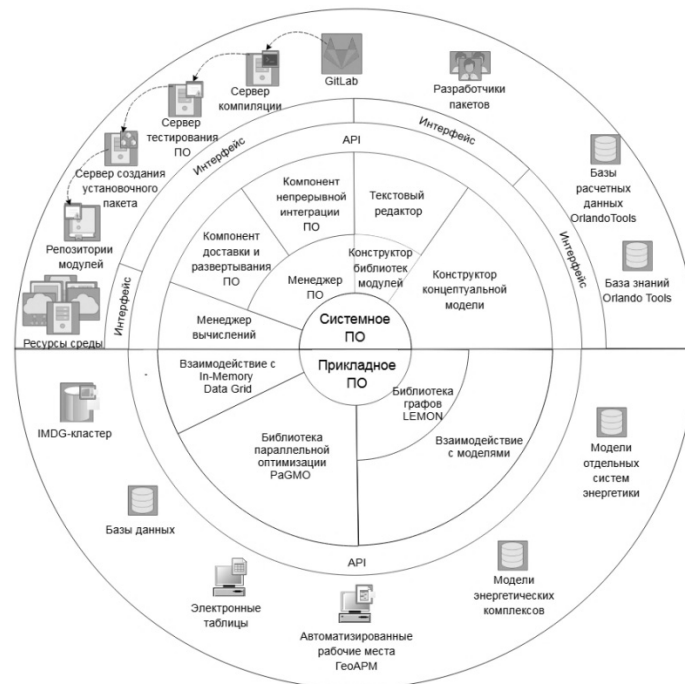


Рис. 4. Архитектура распределенного пакета прикладных программ для оптимизации живучести энергетических инфраструктур

Fig. 4. The architecture of a distributed package of applied programs for optimizing the resilience of an energy infrastructure

Общей возможностью для РППП при исследованиях живучести ЭИ является использование технологии In-Memory Data Grid (IMDG) [70] для хранения и обработки информации [71]. IMDG-кластер – это распределенное хранилище объектов, схожее по интерфейсу с обычной многопоточной хэш-таблицей, где хранятся объекты по ключам. IMDG предназначены для обеспечения высокой скорости обработки и масштабируемости за счет распределения данных между несколькими серверами.

Автоматизированные рабочие места создаются при помощи средства GeoAPM [19] на основе декларативных спецификаций АРМов для работы с БД, а также обеспечивают взаимодействие с внешними подсистемами через API.

5. ИЛЛЮСТРАТИВНЫЙ ПРИМЕР

Апробация выбора алгоритмов оптимизации живучести ЭИ была выполнена на примере системы газоснабжения Европы. Агрегированная расчетная схема данной ЭИ включает в себя свыше 3200 вершин и около 4800 дуг (рис. 5).

Территориально-производственная структура системы газоснабжения Европы представляет собой сеть или ориентированный граф $G = (N, A)$, где N представляет собой множество узлов, A – это множество дуг. В множестве дуг существует подмножество проектируемых дуг $A^B \subseteq A$.

Дуга $(i, j) \in A$ представляет транспортную связь, где узел $i \in N$ является началом, а узел $j \in N$ – концом. С каждой дугой (i, j) связана константа u_{ij} , которая определяет пропускную способность данной дуги. Помимо этого, с каждой проектируемой дугой $(i, j) \in A^B$ связаны капитальные затраты на строительство дуги h_{ij} и двоичная переменная w_{ij} , определяющая возможность строительства дуги.

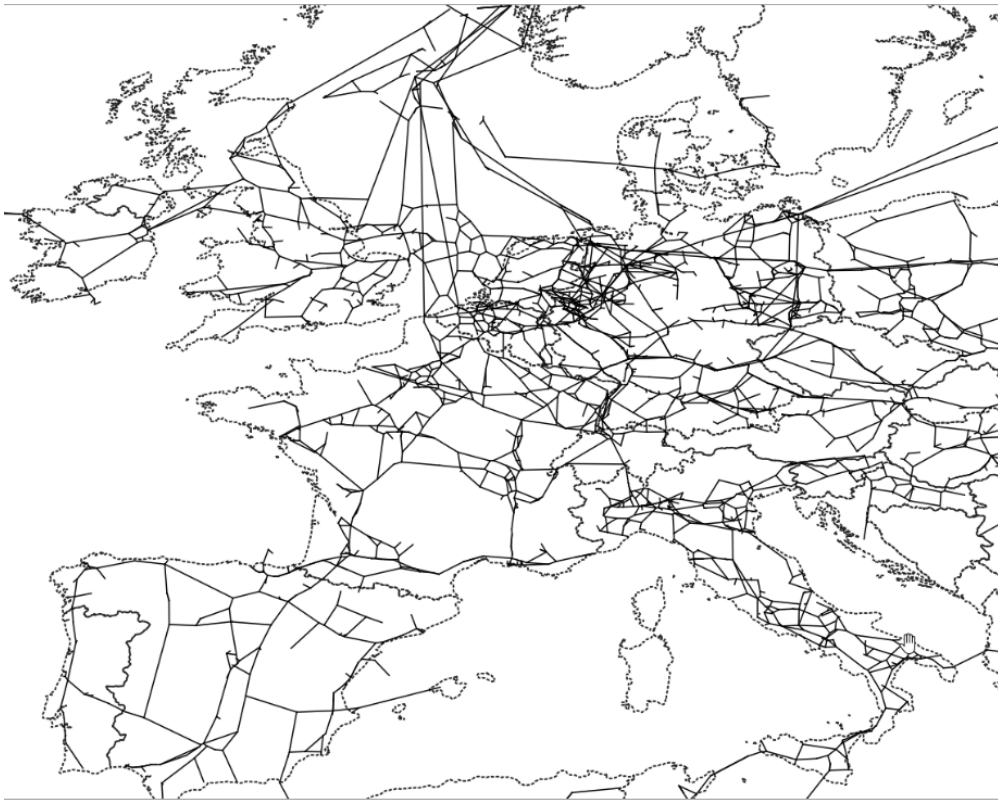


Рис. 5. Схема транспорта газа Европы

Fig. 5. The European natural gas transmission system

С каждым узлом $i \in N$ связаны потребность в энергоресурсе d_i и штраф за недопоставку энергоресурса p_i .

Недопоставка энергоресурса происходит в результате реализации сценария возмущения v из заданного множества V . Сценарий возмущения $v \in V$ представляет собой список дуг $(i, j) \in A$, не входящих в подмножество проектируемых дуг A^B , т. е. $v = \{(i, j) \in A \setminus A^B\}$. Для сокращения недопоставок из двоичных переменных w_{ij} формируется множество W сочетаний мер по повышению живучести $w = \{w_{ij}\}$.

Задача выбора наиболее эффективных сочетаний мер по повышению живучести из множества W при реализации наихудшего возмущения из заданного множества V может быть представлена в виде уточнения постановки (1)–(10) [24]:

$$\min_{w_{ij}} \max_{v \in V} \min_{x_{ij}^v, s_i^v} (-F_1, F_2), \quad (12)$$

$$F_1 = \sum_{i \in N} (d_i - s_i^v) \Big/ \sum_{(i,j) \in A^B} h_{ij} w_{ij}, \quad (13)$$

$$F_2 = D - \sum_{i \in N} (d_i - s_i^v) \Big/ \sum_{i \in N} d_i, \quad (14)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^v - \sum_{(i,j) \in A} x_{ji}^v - s_i^v = d_i, \quad \forall i \in N, \quad (15)$$

$$x_{ij}^v = 0, \quad \forall (i, j) \in v, \quad (16)$$

$$0 \leq x_{ij}^v \leq u_{ij}, \quad \forall (i, j) \notin v \cup A^B, \quad (17)$$

$$0 \leq x_{ij}^v \leq u_{ij} w_{ij}, \quad \forall (i, j) \in A^B, \quad (18)$$

$$s_i^v \geq 0, \quad \forall i \in N, \quad (19)$$

$$w_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall (i, j) \in A^B, \quad (20)$$

$$D \in [0,1], \quad (21)$$

где x_{ij}^v – искомый поток по дуге (i, j) при реализации возмущения $v \in V$; s_i^v – искомая недопоставка энергоресурса в узле $i \in N$ при реализации возмущения $v \in V$; p_i – штраф за недопоставку единицы энергоресурса узлу $i \in N$; D – минимально требуемое значение живучести в долях от единицы.

Целевая функция (12) состоит из двух критериев. Функционально-экономический критерий F_1 в (13) стремится к максимальному сокращению недопоставки энергоресурса при минимизации капитальных затрат на строительство проектируемых дуг $(i, j) \in A^B$. Другими словами, F_1 максимизирует

удельную эффективность мер по повышению живучести. Функциональный критерий F_2 в (14) стремится, чтобы интегральная характеристика живучести ЭИ в результате применения мер по ее повышению была не ниже требуемого значения D .

Равенство (15) представляет баланс газа в узле $i \in N$. Ограничения (16)–(18) определяют поток по дуге $(i, j) \in A$.

В случае если модель (12)–(21) используется для управления функционированием ЭИ, то тогда в качестве элементов A^B могут выступать оперативные мероприятия и мероприятия по восстановлению энергетических объектов, а h_{ij} будут характеризовать затраты на активацию данных мер по повышению живучести. В случае управления развитием ЭИ элементов A^B могут выступать новые или реконструируемые энергетические объекты, а h_{ij} будут представлять капитальные затраты на строительство или реконструкцию объектов соответственно.

В тестовом варианте трехуровневой модели оптимизации живучести (12)–(21) множество V состоит только из одного сценария крупного возмущения $\hat{v}$. Этот сценарий описывает отключение всех отводов на распределительные сети, соединяющих потребителей природного газа с сетью Единой системы газоснабжения. Одновременно отключаемые дуги вносятся в подмножество проектируемых дуг A^B . Помимо этого, в подмножество A^B добавляются все возможные несуществующие дуги между парами узлов, расстояние между которыми не превышает заданного предела. Капитальные затраты h_{ij} дуги $(i, j) \in A^B$ приравниваются ее длине d_{ij} исходя из предположения, что удельные затраты на строительство единицы длины дуги в тестовой модели для всех проектируемых дуг одинаковы и не зависят от рельефа местности.

Основная идея иллюстративного примера заключается в том, что тестируемый алгоритм оптимизации живучести в результате решения должен либо восстановить существующую сеть ЭИ, либо предложить более рациональную структуру подсистемы транспорта энергоресурса.

Для тестирования алгоритмов оптимизации живучести ЭИ был подготовлен испытательный стенд из трех вычислительных узлов, размещенных в облачной среде (характеристики узлов предметно ориентированной среды представлены в табл. 3). С помощью испытательного стенда на тестовом варианте модели (12)–(21) было апробировано несколько эвристических методов поиска оптимальных решений из библиотеки PaGMO (табл. 4). Данные эвристические методы тестировались с настройками, заданными по умолчанию. Первые два метода (алгоритм пчелиной колонии, алгоритм имитации отжига) за заданное предельное время вычислительного эксперимента (4 часа) не смогли выдать сколь-либо приемлемых результатов по критериям F_1 и F_2 . Результаты тестирования по остальным трем методам приведены в табл. 5.

Таблица 3

Table 3

Характеристики узлов предметно ориентированной среды**Characteristics of the domain-specific environment nodes**

Процессор	Оперативная память, Гб	Системный диск, Гб	Операционная система
Intel Xeon E 2288G, 8 ядер, 3.7 ГГц	64	NVMe, 500	Ubuntu 22.04

Таблица 4

Table 4

Тестируемые эвристические методы из библиотеки PaGMO**Testable heuristics from the PaGMO library**

Название численного метода	Название численного метода в PaGMO
Алгоритм пчелиной колонии	pagmo::bee_colony
Алгоритм имитации отжига	pagmo::simulated_annealing
Генетический алгоритм сортировки без доминирования NSGA-II	pagmo::nsga2
Метод роя частиц	pagmo::pso
Самонастраивающийся метод дифференциальной эволюции	pagmo::sade

Таблица 5

Table 5

Результаты тестирования эвристических методов из библиотеки PaGMO**Results of testing heuristic methods from the PaGMO library**

Название численного метода	Операция агрегации	Критерий F1	Критерий F2	Время расчета, мин
Генетический алгоритм сортировки без доминирования NSGA-II	AVG	3.43E-06	0.0915	165.9
	MIN	3.36E-06	-0.0690	
	MAX	3.46E-06	-0.1000	
Метод роя частиц	AVG	2.05E-06	-0.0375	174.7
	MIN	2.05E-06	-0.0375	
	MAX	2.05E-06	-0.0375	
Самонастраивающийся метод дифференциальной эволюции	AVG	2.11E-06	-0.0185	178.6
	MIN	2.03E-06	0.0151	
	MAX	2.20E-06	-0.0553	

Усредненные результаты тестирования (операция агрегации AVG) были проанализированы с помощью семейства методов оценки превосходства альтернатив, активно применяемых для сложных организационно-технических систем. Были выбраны методы TOPSIS и ELECTRE, применимые для решения дискретных многокритериальных задач, к коим относится задача выбора наиболее эффективных алгоритмов оптимизации живучести ЭИ. Ключевой предпосылкой выбора этих методов стал факт наличия инструментария их реализации, доступность, достаточная производительность этого инструментария [72]. В табл. 6 предложена краткая характеристика рассматриваемых методов многокритериального анализа, согласно которым цепочка приоритета оставшихся трех протестированных алгоритмов оптимизации выстроилась следующим образом:

- 1) генетический алгоритм сортировки без доминирования NSGA-II;
- 2) самонастраивающийся метод дифференциальной эволюции;
- 3) метод роя частиц.

Таблица 6

Table 6

Ключевые характеристики выбранных методов многокритериальной оценки альтернатив

Key characteristics of the selected methods for multicriteria evaluation of alternatives

Характеристики	Методы	
	TOPSIS	ELECTRE
Расшифровка аббревиатуры метода	Выбор порядка предпочтения по сходству с идеальным решением	Исключение и выбор в условиях реальности
Идея методов	Поиск решений, максимально приближенных к идеальному состоянию, удаленных от «идеально-негативного» состояния	Анализ согласования альтернатив с учетом двух допустимых уровней (уровней их предпочтения и безразличия) на базе покритеериальных бинарных предпочтений между альтернативами
Мера оценки эффективности альтернативы	Относительная близость к идеальному состоянию	Индексы согласия и несогласия с гипотезой о превосходстве одной альтернативы над другой
Состав исходной информации	Матрица принятия решений, веса критериев оценки альтернатив	Матрица принятия решений, веса критериев оценки альтернатив, уровень предпочтения и безразличия альтернатив
Результат реализации метода	Ранжированный перечень альтернатив с оценками расстояний	Матрицы превосходства альтернатив

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной статье рассмотрены основные аспекты исследования живучести ЭИ, описана одна из самых сложных задач предметной области – оптимизация живучести ЭИ, результатом решения которой являются эффективные комбинации мер, которые обеспечивают системе максимальную живучесть в экстремальных условиях функционирования.

Для решения данной задачи в статье описывается подход, рассматривающий ее как проблему структурно-параметрической оптимизации ЭИ, которая строится по двух- или трехуровневой схеме. На верхних уровнях происходит выбор состава и местоположения оборудования ЭИ, на нижнем уровне – оптимизация режимов работы ЭИ на основе решений, принятых на верхних уровнях. Затем данные об эффективности выбранного оборудования возвращаются обратно наверх для уточнения принятых ранее решений. Описанный в статье подход добавляет в середину вышеописанной схемы еще один слой, в котором выполняется проверка эффективности работы выбранного оборудования в экстремальных условиях, создаваемых заданным множеством крупных возмущений, например, в виде групповых отказов элементов сети ЭИ. Встраивание подобного механизма оценки живучести промежуточных решений в популярные пакеты математической оптимизации является нетривиальной задачей, однако позволяет своевременно корректировать направление оптимизации в сторону повышения живучести ЭИ.

Основным недостатком, который описанный подход наследует от структурно-параметрической оптимизации ЭИ, является высокая вычислительная сложность многоуровневой оптимизационной схемы. Последняя может препятствовать оперативному получению даже приближенных решений задачи оптимизации живучести ЭИ. В последнюю очередь неприемлемое время расчета может объясняться подбором неподходящих оптимизационных алгоритмов. В известных авторам работах, касающихся структурно-параметрической оптимизации ЭИ, вопрос сравнения оптимизационных алгоритмов между собой явно не ставится.

В настоящей статье разработана методика выбора алгоритмов оптимизации, по которой перед решением конкретной задачи оптимизации живучести ЭИ следует сначала провести тестирование алгоритмов, а затем выбрать наилучший из них для решения поставленной задачи. Разработанная методика включает три следующих этапа:

- этап структурирования проблемы, на котором определяются цели и задачи оценки анализируемых алгоритмов, формулируются ключевые позиции выбора методов многокритериальной оценки алгоритмов, уточняются наборы критериев выбора наиболее результативных алгоритмов;

- этап выбора и применения методов многокритериального анализа, в рамках которого определяются и прорабатываются методы инструментальной оценки алгоритмов; для этих методов формируется необходимая исходная информация (матрица принятия решений с покритериальными оценками алгоритмов, значимость критериев оценки альтернатив, ключевые параметры выбранных методов), проводится многокритериальная оценка эффективности алгоритмов;

– этап выбора наиболее эффективных алгоритмов, на котором экспертно оцениваются результаты многокритериальной оценки алгоритмов, выявленные закономерности интерпретируются для определения наиболее эффективных алгоритмов оптимизации живучести ЭИ.

Выбор методов оценки эффективности алгоритмов в методике выполняется исходя из следующих моментов.

1. Наличие инструментальной поддержки предпочтительных методов многокритериального анализа, наглядность и гибкость работы в инструментарии, высокая степень его изучаемости.

2. Практика, широкая область применения алгоритмов, устойчивость получаемых с их помощью решений.

3. Прозрачность математического аппарата методов, простота их применения, их универсальность в части решения схожих типовых задач анализа.

4. Несущественная вычислительная сложность методов, различие механизмов оценки эффективности алгоритмов.

5. Решение проблемы неоднородности критериев, возможность учета их взаимосвязи.

6. Применимость методов к текущей задаче исследования, характеризуемой:

- детерминированными условиями выбора алгоритмов;
- незначительным конечным набором анализируемых алгоритмов, конечным набором критериев их оценки;
- необходимостью ранжирования алгоритмов по степени их эффективности в части выбора предпочтительных наборов мероприятий;
- категорированностью критериев, низкой степенью либо отсутствием их коррелированности.

Для применения методики выбора алгоритмов оптимизации живучести ЭИ необходимо выполнение следующих предварительных условий:

- разработка тестового (облегченного) варианта поставленной задачи оптимизации живучести;
- подготовка испытательного стенда для организации и проведения тестовых вычислительных экспериментов.

Применение методики выбора алгоритмов оптимизации живучести ЭИ продемонстрировано на примере выбора эвристических методов поиска оптимальных решений из библиотеки PaGMO, используемых на наружном уровне схемы оптимизации живучести системы газоснабжения Европы. Всего было протестировано пять популярных эволюционных алгоритмов: алгоритм пчелиной колонии, алгоритм имитации отжига, генетический алгоритм сортировки без доминирования NSGA-II, метод роя частиц и самонастраивающийся метод дифференциальной эволюции. В результате многокритериального анализа результатов тестирования для решения поставленной задачи оптимизации живучести ЭИ был выбран алгоритм NSGA-II. Анализ результатов тестирования проводился методами TOPSIS и ELECTRE.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Надежность систем энергетики и их оборудования. В 4 т. Т. 1. Справочник по общим моделям анализа и синтеза надежности систем энергетики / под ред. Ю.Н. Руденко. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 480 с.

2. Zio E. Challenges in the vulnerability and risk analysis of critical infrastructures // Reliability Engineering and System Safety. – 2016. – Vol. 152. – P. 137–150.
3. A review on resilience assessment of energy systems / P. Gasser, P. Lustenberger, M. Cinelli, W. Kim, M. Spada, P. Burgherr, S. Hirschberg, B. Stojadinović, T.Y. Sun // Sustainable and Resilient Infrastructure. – 2021. – Vol. 6 (5). – P. 273–299. – DOI: 10.1080/23789689.2019.1610600.
4. Основные методические принципы исследования и обеспечения живучести систем энергетики / Н.И. Воропай, Л.Д. Криворуцкий, Ю.Н. Руденко, И.А. Шер // Методы и модели исследования живучести систем энергетики / отв. ред. Ю.Н. Руденко. – Новосибирск: Наука, 1990. – С. 9–17.
5. Voropai N., Rehtanz C. Flexibility and resiliency of electric power systems: analysis of definitions and content // EPJ Web of Conferences. – 2019. – Vol. 217. – P. 1018.
6. О влиянии организационно-технических мероприятий на каскадное развитие аварий в электроэнергетических системах с неоднородными параметрами / Б.М. Гайсин, И.З. Шахмаев, П.В. Илюшин, М.А. Рабинович // Электричество. – 2023. – № 5. – С. 24–37.
7. Hosseini S., Barker K., Ramirez-Marquez J.E. A review of definitions and measures of system resilience // Reliability Engineering and System Safety. – 2016. – Vol. 145. – P. 47–61.
8. Надежность систем энергетики: сборник рекомендуемых терминов / отв. ред. Н.И. Воропай. – М.: Энергия, 2007. – 194 с.
9. Battling the extreme: a study on the power system resilience / Z. Bie, Y. Lin, G. Li, F. Li // Proceedings of the IEEE. – 2017. – Vol. 105 (7). – P. 1253–1266.
10. Sharifi A., Yamagata Y. Principles and criteria for assessing urban energy resilience: a literature review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – Vol. 60. – P. 1654–1677.
11. Lin Y., Bie Z., Qiu A. A review of key strategies in realizing power system resilience // Global Energy Interconnection. – 2018. – Vol. 1 (1). – P. 70–78.
12. Metrics and quantification of operational and infrastructure resilience in power systems / M. Panteli, P. Mancarella, D.N. Trakas, E. Kyriakides, N.D. Hatziargyriou // IEEE Transactions on Power Systems. – 2017. – Vol. 32 (6). – P. 4732–4742.
13. Dehghani, A., Sedighzadeh, M. and Haghjoo, F. An overview of the assessment metrics of the concept of resilience in electrical grids // International Transactions on Electrical Energy Systems. – 2021. – Vol. 31, N. 12. P. 13159.
14. Toward a consensus on the definition and taxonomy of power system resilience / A. Gholami, T. Shekari, M.H. Amirioun, F. Aminifar, M.H. Amini, A. Sargolzaei // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – P. 32035–32053.
15. Ahmadi S., Saboohi Y., Vakili A. Frameworks, quantitative indicators, characters, and modeling approaches to analysis of energy system resilience: a review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2021. – Vol. 144. – P. 110988.
16. Gallopoulos E., Houstis E., Rice J.R. Computer as thinker/door: problem-solving environments for computational science // IEEE Computational Science and Engineering. – 1994. – Vol. 1 (2). – P. 11–23. – DOI: 10.1109/99.326669.
17. Problem-solving environments for computational science / E. Houstis, E. Gallopoulos, R. Bramley, J. Rice // IEEE Computational Science and Engineering. – 1997. – Vol. 4 (3). – P. 18–21. – DOI: 10.1109/MCSE.1997.615427.
18. Поддержка управления живучестью систем энергетики на основе комбинаторного подхода / И.В. Бычков, С.А. Горский, А.В. Еделев, Р.О. Костромина, И.А. Сидорова, А.Г. Феоктистова, Е.С. Фереферова, Р.К. Федоров // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2021. – № 6. – С. 122–135. – DOI: 10.31857/S000233882106007X.
19. Фереферов Е.С., Бычков И.В., Хмельнов А.Е. Технология разработки приложений баз данных на основе декларативных спецификаций // Вычислительные технологии. – 2014. – Т. 19, № 5. – С. 85–100.
20. Еделев А.В., Береснева Н.М. Подход к моделированию функционирования взаимосвязанных систем энергетики в условиях возмущений и его программная поддержка // Программные продукты и системы. – 2021. – Т. 34, № 3. – С. 409–419. – DOI: 10.15827/0236-235X.135.409-419.
21. Иерархическое моделирование систем энергетики / отв. ред.: Н.И. Воропай, В.А. Стенников. – Новосибирск: Гео, 2020. – 314 с.
22. Еделев А.В., Береснева Н.М., Горский С.А. Анализ уязвимости энергетической инфраструктуры и его реализация // Современные наукоемкие технологии. – 2022. – № 1. – С. 47–52. – DOI: 10.17513/snt.39008.
23. Распределенная вычислительная среда для анализа уязвимости критических инфраструктур в энергетике / А.В. Еделев, С.М. Сендеров, Н.М. Береснева, И.А. Сидоров, А.Г. Феок-

тистов // Системы управления, связи и безопасности. – 2018. – № 3. – С. 197–231. – URL: <http://scs.intelgr.com/archive/2018-03/10-Edelev.pdf> (дата обращения: 30.11.2023).

24. *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*. – Catonsville, MD: Informs, 2014. – P. 180–215. – DOI: 10.1287/educ.2014.0131.

25. Поддержка управления живучестью систем энергетики на основе комбинаторного подхода / И.В. Бычков, С.А. Горский, А.В. Еделев, Р.О. Костромина, И.А. Сидорова, А.Г. Феоктистова, Е.С. Переферова, Р.К. Федоров // *Известия РАН. Теория и системы управления*. – 2021. – № 6. – С. 122–135. – DOI: 10.31857/S000233882106007X.

26. A review of the measures to enhance power systems resilience / M. Mahzarnia, M.P. Moghaddam, P.T. Baboli, P. Siano // *IEEE Systems Journal*. – 2020. – Vol. 14 (3). – P. 4059–4070. – DOI: 10.1109/JSYST.2020.2965993.

27. *Еделев А.В., Зоркальцев В.И.* Формирование вариантов развития систем энергетики методами комбинаторного моделирования // *Сибирский журнал индустриальной математики*. – 2018. – Т. 21 (3). – С. 37–49.

28. *Еделев А.В., Зоркальцев В.И.* Алгоритм определения оптимальных и субоптимальных траекторий развития систем // *Сибирский журнал индустриальной математики*. – 2019. – № 22 (1). – С. 34–40.

29. Sustaining power resources through energy optimization and engineering / P. Vasant, N. Voropai, eds. – Hershey, PA: Engineering Science Reference, 2016. – 494 p.

30. *Wakui T., Hashiguchi M., Yokoyama R.* Structural design of distributed energy networks by a hierarchical combination of variable-and constraint-based decomposition methods // *Energy*. – 2021. – Vol. 224. – P. 120099.

31. *Goderbauer S., Comis M., Willamowski F.J.* The synthesis problem of decentralized energy systems is strongly NP-hard // *Computers & Chemical Engineering*. – 2019. – Vol. 124. – P. 343–349.

32. *Frangopoulos C.A.* Recent developments and trends in optimization of energy systems // *Energy*. – 2018. – Vol. 164. – P. 1011–1020.

33. A generalised optimal design methodology for distributed energy systems / L. Schmeling, P. Schönfeldt, P. Klement, L. Vorspel, B. Hanke, K. von Maydell, C. Agert // *Renewable Energy*. – 2022. – Vol. 200. – P. 1223–1239.

34. Развитие моделей и теории цепей и их энергетических приложений / Б.М. Каганович, Н.И. Воропай, В.А. Стенников, Н.Н. Новицкий // *Известия Российской академии наук. Энергетика*. – 2017. – № 6. – С. 24–32.

35. Intellectualization of heat-supply systems: current state, trends and tasks (a review) / N.N. Novitskii, Z.I. Shalaginova, A.V. Alekseev, O.A. Grebneva, V.V. Tokarev, A.V. Lutsenko, O.V. Vanteeva // *Thermal Engineering*. – 2022. – Vol. 69 (5). – P. 367–383.

36. A non-linear resilient-oriented planning of the energy hub with integration of energy storage systems and flexible loads / A.Z.G. Seyyedi, M.J. Armand, E. Akbari, J. Moosanezhad, F. Khorasani, M. Raeesinia // *Journal of Energy Storage*. – 2022. – Vol. 51. – P. 104397.

37. *Rahgozar S., Seyyedi A.Z.G., Siano P.* A resilience-oriented planning of energy hub by considering demand response program and energy storage systems // *Journal of Energy Storage*. – 2022. – Vol. 52. – P. 104841.

38. *Клер А.М., Жарков П.В.* Схемно-параметрическая оптимизация локальных систем энергоснабжения // *Известия Российской академии наук. Энергетика*. – 2016. – № 4. – С. 49–61.

39. *Pfetsch M.E., Schmitt A.* A generic optimization framework for resilient systems // *Optimization Methods and Software*. – 2023. – Vol. 38 (2). – P. 1–30.

40. *Honarmand H.A., Shamim A.G., Meyar-Naimi H.* A robust optimization framework for energy hub operation considering different time resolutions: A real case study // *Sustainable Energy, Grids and Networks*. – 2021. – Vol. 28. – P. 100526.

41. Энергетическая безопасность России / В.В. Бушуев, Н.И. Воропай, А.М. Мастепанов, Ю.К. Шафраник и др. – Новосибирск: Наука, 1998. – 302 с.

42. Looking for Alternatives: optimization of energy supply systems without superstructure / M. Preuss, P. Voll, A. Bardow, G. Rudolph // *Applications of Evolutionary Computation: 17th European Conference, EvoApplications 2014, Granada, Spain, April 23–25*. – Springer Berlin Heidelberg, 2014. – P. 177–188.

43. *Криворучкий Л.Д., Массель Л.В.* Информационная технология исследований развития энергетики. – Новосибирск: Наука, 1995. – 160 с.

44. *Goderbauer S., Comis M., Willamowski F.J.* The synthesis problem of decentralized energy systems is strongly NP-hard // *Computers & Chemical Engineering*. – 2019. – Vol. 124. – P. 343–349.

45. A generalised optimal design methodology for distributed energy systems / L. Schmeling, P. Schönfeldt, P. Klement, L. Vorspel, B. Hanke, Maydell K. von, C. Agert // *Renewable Energy*. – 2022. – Vol. 200. – P. 1223–1239.
46. Prakash P., Khatod D.K. Optimal sizing and siting techniques for distributed generation in distribution systems: a review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – Vol. 57. – P. 111–130.
47. Erdinc O., Uzunoglu M. Optimum design of hybrid renewable energy systems: overview of different approaches // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2012. – Vol. 16 (3). – P. 1412–1425.
48. Костромин П.О. Стенд имитационного моделирования и визуализации процессов работы инфраструктурных объектов // *Современные наукоемкие технологии*. – 2022. – № 1. – С. 59–64. – DOI: 10.17513/snt.39010.
49. Optimal multi-objective placement and sizing of distributed generation in distribution system: a comprehensive review / M. Kumar, A.M. Soomro, W. Uddin, L. Kumar // *Energies*. – 2022. – Vol. 5 (21). – P. 7850.
50. A review of evaluation, optimization and synthesis of energy systems: methodology and application to thermal power plants / L. Wang, Z. Yang, S. Sharma, A. Mian, T.E. Lin, G. Tsatsaronis, F. Maréchal, Y. Yang // *Energies*. – 2018. – Vol. 12 (1). – P. 73.
51. Rinnoy Kan A.H.G., Timmer G.T. Stochastic global optimization methods // *Mathematical Programming*. – 1987. – Vol. 39. – P. 27–78.
52. Параллельные вычисления в задачах механики космического полета / М.Г. Широбок, С.П. Трофимов, А.А. Целоусова, М.Д. Коптев // *XLIII Академические чтения по космонавтике: сборник тезисов*. – М., 2019. – Т. 1. – P. 132–133.
53. Стронгин Р.Г., Гергель В.П., Баркалов К.А. Адаптивная глобальная оптимизация на основе блочно-рекурсивной схемы редукции размерности // *Автоматика и телемеханика*. – 2020. – № 8. – С. 136–148. – DOI: 10.31857/S0005231020080103. – EDN OULLGO.
54. Реализация параллельного алгоритма поиска глобального экстремума функции на Intel Xeon Phi / К.А. Баркалов, И.Г. Лебедев, В.В. Соврасов, А.В. Сысоев // *Вычислительные методы и программирование*. – 2016. – Т. 17 (1). – С. 101–110.
55. Баркалов К.А., Гетманская А.А., Исрафилов Р.А. Применение адаптивной схемы редукции размерности для задач многоэкстремальной оптимизации с нелинейными ограничениями // *Научные проблемы водного транспорта*. – 2018. – № 54. – С. 11–19.
56. Еришов Н.М., Попова Н.Н. Автоматическая генерация параллельных алгоритмов машинного обучения и эволюционных вычислений // *Суперкомпьютерные дни в России: труды Международной конференции, Москва, 26–27 сентября 2016 г.* – М., 2016. – С. 814–815. – EDN WXJJAL.
57. Курейчик В.М., Кныш Д.С. Параллельный генетический алгоритм. Модели и проблемы построения // *Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте: труды V Международной научно-практической конференции*. – М.: Физматлит, 2009. – Т. 1. – С. 41–51.
58. Izzo D., Ruciński M., Biscani F. The generalized island model // *Parallel Architectures and Bioinspired Algorithms*. – Springer, 2012. – P. 151–169. – DOI: 10.1007/978-3-642-28789-3_7.
59. Брестер К.Ю., Рыжиков И.С. Исследование островной модели кооперации генетических алгоритмов для решения задач многокритериальной оптимизации // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. – 2018. – Т. 2, № 4 (14). – С. 7–9. – EDN YUIGLR.
60. Biscani F., Izzo D. A parallel global multiobjective framework for optimization: pagmo // *Journal of Open Source Software*. – 2020. – Vol. 5 (53). – P. 2338.
61. Evox: a distributed GPU-accelerated library towards scalable evolutionary computation / B. Huang, R. Cheng, Y. Jin, K.C. Tan. – arXiv:2301.12457. – 2023.
62. Parametric optimization on HPC clusters with Geneva / J. Weßner, R. Berlich, K. Schwarz, M.F. Lutz // *Computing and Software for Big Science*. – 2023. – Vol. 7 (1). – P. 4.
63. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II / K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T. Meyarivan // *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. – 2002. – Vol. 6 (2). – P. 182–197. – DOI: 10.1109/4235.996017.
64. Biegler L.T., Zavala V.M. Large-scale nonlinear programming using IPOPT: an integrating framework for enterprise-wide dynamic optimization // *Computers & Chemical Engineering*. – 2009. – Vol. 33 (3). – P. 575–582.
65. Johnson S.G. The NLOpt nonlinear-optimization package. – URL: <http://github.com/stevengj/nlopt> (accessed: 30.11.2023).

66. An algorithmic framework for convex mixed integer nonlinear programs / P. Bonami, L.T. Biegler, A.R. Conn, G. Cornuéjols, I.E. Grossmann, C.D. Laird, J. Lee, A. Lodi, F. Margot, N. Sawaya, A. Wächter // *Discrete Optimization*. – 2008. – Vol. 5 (2). – P. 186–204.

67. Kovács P. Minimum-cost flow algorithms: an experimental evaluation // *Optimization Methods and Software*. – 2015. – Vol. 30 (1). – P. 94–127.

68. Что такое In-Memory Data Grid. – URL: <https://habr.com/ru/post/160517/> (дата обращения: 30.11.2023).

69. Large-scale analysis of the energy system vulnerability using an in-memory data grid / A.V. Edelev, I.A. Sidorov, S.A. Gorsky, A.G. Feoktistov // *ICCS-DE 2020. Proceedings of the 2nd International Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments*. – Irkutsk, Russia, 2020. – P. 89–98. – (CEUR-WS Proceedings; vol. 2638).

70. Jablonsky J. MS Excel based software support tools for decision problems with multiple criteria // *Procedia Economics and Finance*. – 2014. – Vol. 12. – P. 251–258.

Еделев Алексей Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории живучести систем энергетики № 33 Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук. Основное направление научных исследований – живучесть систем энергетики, математическое моделирование, оптимизация, параллельные вычисления. Имеет более 60 печатных работ. E-mail: flower@isem.irk.ru

Береснева Наталья Михайловна, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории живучести систем энергетики № 33 Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук. Основное направление научных исследований – живучесть систем энергетики, математическое моделирование. Имеет более 30 печатных работ. E-mail: beresneva@isem.irk.ru

Костромин Роман Олегович, кандидат технических наук, заведующий лабораторией, научный сотрудник лаборатории параллельных и распределенных вычислительных систем Института динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова Сибирского отделения Российской академии наук. Основное направление научных исследований – мультиагентные технологии, распределенные и параллельные вычисления, DevOps. Имеет более 40 печатных работ. E-mail: kostromin@icc.ru

Edelev Alexei V., PhD (Eng.), senior researcher in the laboratory "Energy systems survivability laboratories" No. 33, the Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. His research interests are currently focused on mathematical modeling, optimization methods and survivability of energy systems. He has more than 60 publications. E-mail: flower@isem.irk.ru

Beresneva Natalya M., PhD (Eng.), researcher in the laboratory "Energy Systems Survivability Laboratories" No. 33, Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Her research interests are currently focused on the survivability of energy systems, on mathematical modeling. She has more than 30 publications. E-mail: beresneva @isem.irk.ru.

Kostromin Roman O., PhD (Eng.), Head of the Laboratory, Researcher at the Laboratory of Parallel and Distributed Computing Systems, the Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. His research interests are currently focused on multi-agent technologies, distributed and parallel computing, DevOps. He has more than 40 publications. E-mail: kostromin@icc.ru.

A methodology for selecting algorithms for optimizing the resilience of energy infrastructures**A.V. EDELEV^{1,a}, N.M. BERESNEVA^{1,b}, R.O. KOSTROMIN^{2,c}*¹ Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 130 Lermontov Street, Irkutsk, 664033, Russian Federation² Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 134 Lermontov Street, Irkutsk, 664033, Russian Federation^a flower@isem.irk.ru ^b beresneva@isem.irk.ru ^c kostromin@icc.ru**Abstract**

The article considers one of the most difficult tasks of studying the resilience of energy infrastructures – finding effective combinations of measures to increase resilience. To solve this problem, the article describes an approach that considers it as a problem of structural-parametric optimization of energy infrastructures, which is built according to a two- or three-level scheme. The approach described in the article adds another layer to the middle of the above scheme, which checks the efficiency of the selected equipment under extreme conditions created by a given set of large disturbances. The main disadvantage that the approach inherits from the structural-parametric optimization of energy infrastructures is a high computational complexity of the multilevel optimization scheme. However, the unacceptable calculation time can be explained by the selection of inappropriate optimization algorithms. In the papers concerning the structural-parametric optimization of energy infrastructures publ in the literature, the question of comparing optimization algorithms with each other is clearly not raised. Therefore, this article proposes a three-stage methodology for selecting optimization algorithms, according to which, before solving a specific problem of optimizing the resilience of energy infrastructures, first test the algorithms, and then choose the best one based on a multi-criteria analysis of the test results. To apply the methodology, it is necessary to develop a special lightweight version of the task of optimizing resilience and prepare a testbed for organizing and conducting test computational experiments. The application of the methodology is demonstrated by the example of choosing heuristic methods for finding optimal solutions from the PaGMO library used at the external level of the resilience optimization scheme of the Unified Gas Supply System of Russia. In total, five popular evolutionary algorithms were tested, the most suitable of which turned out to be a genetic sorting algorithm without NSGA-II dominance.

Keywords: energy systems, critical infrastructures, resilience, mathematical model, optimization algorithms, multi-criteria analysis, subject-oriented environment, testbed

REFERENCES

1. Rudenko Yu.N., ed. *Nadezhnost' sistem energetiki i ikh oborudovaniya*. V 4 t. T. 1. *Spravochnik po obshchim modelyam analiza i sinteza nadezhnosti sistem energetiki* [Reliability of energy systems and their equipment. In 4 vols. Vol.1. Reference book on General models of analysis and synthesis of reliability of power systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1994. 480 p.
2. Zio E. Challenges in the vulnerability and risk analysis of critical infrastructures. *Reliability Engineering and System Safety*, 2016, vol. 152, pp. 137–150.
3. Gasser P., Lustenberger P., Cinelli M., Kim W., Spada M., Burgherr P., Hirschberg S., Stojadinović B., Sun T.Y. A review on resilience assessment of energy systems. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 2021, vol. 6 (5), pp. 273–299. DOI: 10.1080/23789689.2019.1610600.

* Received 30 August 2023.

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-29-00460.

4. Voropai N.I., Krivorutskii L.D., Rudenko Yu.N., Sher I.A. Osnovnye metodicheskie printsipy issledovaniya i obespecheniya zhivuchesti sistem energetiki [Basic methodological principles of research and ensuring the survivability of energy systems]. *Metody i modeli issledovaniya zhivuchesti sistem energetiki* [Methods and models of research vitality energy systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1990, pp. 9–17.
5. Voropai N., Rehtanz C. Flexibility and resiliency of electric power systems: analysis of definitions and content. *EPJ Web of Conferences*, 2019, vol. 217, p. 1018.
6. Gaysin B.M., Shakhmaev I.Z., Ilyushin P.V., Rabinovich M.A. O vliyaniy organizatsionno-tekhnicheskikh meropriyatiy na kaskadnoe razvitiye avarii v elektroenergeticheskikh sistemakh s neodnorodnymi parametrami [On the influence of organizational and technical measures on the cascade evolvement of accidents in electric power systems with heterogeneous parameters]. *Elektrichestvo = Electrical Technology Russia*, 2023, no. 5, pp. 24–37.
7. Hosseini S., Barker K., Ramirez-Marquez J.E. A review of definitions and measures of system resilience. *Reliability Engineering and System Safety*, 2016, vol. 145, pp. 47–61.
8. Voropai N.I., ed. *Nadezhnost' sistem energetiki: sbornik rekomenduemykh terminov* [Reliability of energy systems. Collection of recommended terms]. Moscow, Energiya Publ., 2007. 194 p.
9. Bie Z., Lin Y., Li G., Li F. Battling the extreme: a study on the power system resilience. *Proceedings of the IEEE*, 2017, vol. 105 (7), pp. 1253–1266.
10. Sharifi A., Yamagata Y. Principles and criteria for assessing urban energy resilience: a literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 60, pp. 1654–1677.
11. Lin Y., Bie Z., Qiu A. A review of key strategies in realizing power system resilience. *Global Energy Interconnection*, 2018, vol. 1 (1), pp. 70–78.
12. Panteli M., Mancarella P., Trakas D.N., Kyriakides E., Hatziaargyriou N.D. Metrics and quantification of operational and infrastructure resilience in power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, vol. 32 (6), pp. 4732–4742.
13. Dehghani A., Sedighzadeh M., Haghjoo F. An overview of the assessment metrics of the concept of resilience in electrical grids. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2021, vol. 31 (12), p. 13159.
14. Gholami A., Shekari T., Amiroun M.H., Aminifar F., Amini M.H., Sargolzaei A. Toward a consensus on the definition and taxonomy of power system resilience. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 32035–32053.
15. Ahmadi S., Saboohi Y., Vakili A. Frameworks, quantitative indicators, characters, and modeling approaches to analysis of energy system resilience: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, vol. 144, p. 110988.
16. Gallopoulos E., Houstis E., Rice J.R. Computer as thinker/door: problem-solving environments for computational science. *IEEE Computational Science and Engineering*, 1994, vol. 1 (2), pp. 11–23. DOI: 10.1109/99.326669.
17. Houstis E., Gallopoulos E., Bramley R., Rice J. Problem-solving environments for computational science. *IEEE Computational Science and Engineering*, 1997, vol. 4 (3), pp. 18–21. DOI: 10.1109/MCSE.1997.615427.
18. Edelev A.V., Gorsky S.A., Feoktistov A.G., Bychkov I.V., Marchenko M.A. [Development of distributed computing management tools in Orlando Tools]. *Parallel'nye vychislitel'nye tekhnologii (PaVT'2023)* [Parallel computational technologies (PCT'2023)], St. Petersburg, 2023, pp. 143–154. (In Russian).
19. Fereferov E.S., Bychkov I.V., Hmel'nov A.E. Tekhnologiya razrabotki prilozhenii baz dannykh na osnove deklarativnykh spetsifikatsii [Technology for database applications based on declarative specifications]. *Vychislitel'nye tekhnologii = Computational Technologies*, 2014, vol. 19 (5), pp. 85–100.
20. Edelev A.V., Beresneva N.M. Podkhod k modelirovaniyu funktsionirovaniya vzaimosvyazannykh sistem energetiki v usloviyakh vozmushchenii i ego programmaya podderzhka [An approach to modeling the functioning of Interdependent energy systems under disturbances and its software support]. *Programmnye produkty i sistemy = Software & Systems*, 2021, vol. 34 (3), pp. 409–419. DOI: 10.15827/0236-235X.135.409-419.
21. Voropai N.I., Stennikov V.A., eds. *Ierarkhicheskoe modelirovanie sistem energetiki* [Hierarchical modeling of energy systems]. Novosibirsk, Geo Publ., 2020. 314 p.
22. Edelev A.V., Beresneva N.M., Gorskiy S.A. Analiz uyazvimosti energeticheskoi in-frastruktury i ego realizatsiya [Vulnerability analysis of energy infrastructure and its implementation]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Modern High Technologies*, 2022, no. 1, pp. 47–52. DOI: 10.17513/snt.39008.

23. Edelev A.V., Senderov S.M., Beresneva N.M., Sidorov I.A., Feoktistov A.G. Raspredelenaya vychislitel'naya sreda dlya analiza uyazvimosti kriticheskikh infrastruktur v energetike [Distributed computing environment for an analysis of the vulnerability of critical infrastructures in energy sector]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti = Systems of Control, Communication and Security*, 2018, no. 3, pp. 197–231. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-03/10-Edelev.pdf> (accessed 30.11.2023).
24. 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*. Catonsville, MD, Informa, 2014, pp. 180–215. DOI: 10.1287/educ.2014.0131.
25. Bychkov I.V., Gorsky S.A., Edelev A.V., Kostromin R.O., Sidorov I.A., Feoktistov A.G., E.S. Fereferov A.G., Fedorov R.K. Support for managing the survivability of energy systems based on a combinatorial approach. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2021, vol. 60, no. 6, pp. 981–994. Translated from *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2021, no. 6, pp. 122–135. DOI: 10.31857/S000233882106007X.
26. Mahzarnia M., Moghaddam M.P., Baboli P.T., Siano P. A review of the measures to enhance power systems resilience. *IEEE Systems Journal*, 2020, vol. 14 (3), pp. 4059–4070. DOI: 10.1109/JSYST.2020.2965993.
27. Edelev A.V., Zorkaltsev V.I. *Formirovanie variantov razvitiya sistem energetiki metodami kombinatornogo modelirovaniya* [Formation of the development options for energy systems by combinatorial modeling methods]. *Sibirskii zhurnal industrial'noi matematiki = Journal of Applied and Industrial Mathematics*, 2018, no. 21 (3), pp. 37–49. (In Russian).
28. Edelev A.V., Zorkaltsev V.I. Algoritm opredeleniya optimal'nykh i suboptimal'nykh traektorii razvitiya sistem [An algorithm for determining optimal and suboptimal trajectories of the development of a system]. *Sibirskii zhurnal industrial'noi matematiki = Journal of Applied and Industrial Mathematics*, 2019, no. 22 (1), pp. 34–40. (In Russian).
29. Vasant P., Voropai N., eds. *Sustaining power resources through energy optimization and engineering*. Hershey, PA, Engineering Science Reference, 2016. 494 p.
30. Wakui T., Hashiguchi M., Yokoyama R. Structural design of distributed energy networks by a hierarchical combination of variable-and constraint-based decomposition methods. *Energy*, 2021, vol. 224, p. 120099.
31. Goderbauer S., Comis M., Willamowski F.J. The synthesis problem of decentralized energy systems is strongly NP-hard. *Computers & Chemical Engineering*, 2019, vol. 124, pp. 343–349.
32. Frangopoulos C.A. Recent developments and trends in optimization of energy systems. *Energy*, 2018, vol. 164, pp. 1011–1020.
33. Schmeling L., Schönfeldt P., Klement P., Vorspel L., Hanke B., Maydell K. von, Agert C. A generalised optimal design methodology for distributed energy systems. *Renewable Energy*, 2022, vol. 200, pp. 1223–1239.
34. Kaganovich B.M., Voropai N.I., Stennikov V.A., Novickii N.N. *Razvitie modelei i teorii tsepei i ikh energeticheskikh prilozhenii* [Development of models and theory of circuits and their energy applications]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Energetika = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, 2017, no. 6, pp. 24–32.
35. Novitskii N.N., Shalaginova Z.I., Alekseev A.V., Grebneva O.A., Tokarev V.V., Lutsenko A.V., Vanteeva O.V. *Thermal Engineering*, 2022, vol. 69 (5), pp. 367–383.
36. Seyyedi A.Z.G., Armand M.J., Akbari E., Moosanezhad J., Khorasani F., Raeesinia M. A non-linear resilient-oriented planning of the energy hub with integration of energy storage systems and flexible loads. *Journal of Energy Storage*, 2022, vol. 51, p. 104397.
37. Rahgozar S., Seyyedi, A.Z.G. and Siano, P. A resilience-oriented planning of energy hub by considering demand response program and energy storage systems. *Journal of Energy Storage*, 2022, vol. 52, p. 104841.
38. Kler A.M., Zharkov P.V. *Skhemno-parametricheskaya optimizatsiya lokal'nykh sistem energosnabzheniya* [Circuit-parametric optimization of local power supply systems]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Energetika = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, 2016, no. 4, pp. 49–61.
39. Pfetsch M.E., Schmitt A. A generic optimization framework for resilient systems. *Optimization Methods and Software*, 2023, VOL. 38 (2), pp. 1–30.
40. Honarmand H.A., Shamim A.G., Meyar-Naimi H. A robust optimization framework for energy hub operation considering different time resolutions: a real case study. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2021, vol. 28, p. 100526.

41. Bushuev V.V., Voropai N.I., Mastepanov A.M., Shafranik Yu.K. *Energeticheskaya bezopasnost' Rossii* [Energy security of Russia]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1998. 302 p.
42. Preuss M., Voll P., Bardow A., Rudolph G. Looking for alternatives: optimization of energy supply systems without superstructure. *Applications of Evolutionary Computation: 17th European Conference, EvoApplications 2014*, Granada, Spain, April 23–25. Springer Berlin Heidelberg, 2014, pp. 177–188.
43. Krivorutskii L.D., Massel' L.V. *Informatsionnaya tekhnologiya issledovaniy razvitiya energetiki* [Energy development research information technology]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1995. 160 p.
44. Goderbauer S., Comis M., Willamowski F.J. The synthesis problem of decentralized energy systems is strongly NP-hard. *Computers & Chemical Engineering*, 2019, vol. 124, pp. 343–349.
45. Schmeling L., Schönfeldt P., Klement P., Vorspel L., Hanke B., Maydell K. von, Agert C. A generalised optimal design methodology for distributed energy systems. *Renewable Energy*, 2022, vol. 200, pp. 1223–1239.
46. Prakash P., Khatod D.K. Optimal sizing and siting techniques for distributed generation in distribution systems: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 57, pp. 111–130.
47. Erdinc O., Uzunoglu M. Optimum design of hybrid renewable energy systems: overview of different approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, vol. 16 (3), pp. 1412–1425.
48. Kostromin R.O. *Stend imitatsionnogo modelirovaniya i vizualizatsii protsessov raboty infrastrukturykh ob'ektov* [Stand for simulation modeling and visualization of the processes of work of infrastructure facilities]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Modern high technologies*, 2022, no. 1, pp. 59–64. – DOI: 10.17513/snt.39010.
49. Kumar M., Soomro A.M., Uddin W., Kumar L. Optimal multi-objective placement and sizing of distributed generation in distribution system: a comprehensive review. *Energies*, 2022, vol. 5 (21), p. 7850.
50. Wang L., Yang Z., Sharma S., Mian A., Lin T.E., Tsatsaronis G., Maréchal F., Yang Y. A review of evaluation, optimization and synthesis of energy systems: methodology and application to thermal power plants. *Energies*, 2018, vol. 12 (1), p. 73.
51. Rinnoy Kan A.H.G., Timmer G.T. Stochastic global optimization methods. *Mathematical Programming*, 1987, vol. 39, pp. 27–78.
52. Shirobokov M.G., Trofimov S.P., Tselousova A.A., Koptev M.D. [Parallel computing in problems of space flight mechanics]. *XLIII Akademicheskie chteniya po kosmonavtike*. T. 1 [XLIII Academic Space Conference. Vol. 1]. Abstracts Moscow, 2019, pp. 132–133. (In Russian).
53. Strongin R.G., Gergel V.P., Barkalov K.A. Adaptivnaya global'naya optimizatsiya na osnove blochno-rekursivnoi skhemy reduktsii razmernosti [Adaptive global optimization based on a block-recursive dimensionality reduction scheme]. *Avtomatika i telemekhanika = Automation and Remote Control*, 2020, no. 8, pp. 136–148. DOI: 10.31857/S0005231020080103.
54. Barkalov K.A., Lebedev I.G., Sovrasov V.V., Sysoyev A.V. Realizatsiya parallel'nogo algoritma poiska global'nogo ekstremuma funktsii na Intel Xeon Phi [Implementation of a parallel algorithm for searching the global extremum of a function on Intel Xeon Phi]. *Vychislitel'nye metody i programirovanie = Numerical methods and programming*, 2016, vol. 17 (1), pp. 101–110.
55. Barkalov K.A., Getmanskaya A.A., Israfilov R.A. Primenenie adaptivnoi skhemy reduktsii razmernosti dlya zadach mnogoekstremal'noi optimizatsii s nelineinymi ogranicheniyami [Application of the adaptive dimensionality reduction scheme to problems of multiextremal optimization with non-linear constraints]. *Nauchnye problemy vodnogo transporta = Russian Journal of Water Transport*, 2018, no. 54, pp. 11–19.
56. Ershov N.M., Popova N.N. [Automatic generation of parallel algorithms for machine learning and evolutionary computing]. *Superkomp'yuternye dni v Rossii* [Russian Supercomputing Days]. Proceedings of the International Conference, Moscow, 26–27 September 2016, pp. 814–815. (In Russian).
57. Kureichik V.M., Knysh D.S. [Parallel genetic algorithm. Building models and problems]. *Integrirovannye modeli i myagkie vychisleniya v iskusstvennom intellekte* [Integrated models and soft computing in artificial intelligence]. Proceedings of the 5th International Conference. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009, pp. 41–51. (In Russian).
58. Izzo D., Ruciński M., Biscani F. The generalized island model. *Parallel architectures and bioinspired algorithms*. Springer, 2012, pp. 151–169. DOI: 10.1007/978-3-642-28789-3_7.
59. Brester Ch.Yu., Ryzhikov I.S. Issledovanie ostrovnogo modeli kooperatsii geneticheskikh algoritmov dlya resheniya zadach mnogokriterial'noi optimizatsii [An investigation of an island model cooperation of genetic algorithms for solving multicriteria optimization problems]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki = Actual problems of aviation and cosmonautics*, 2018, vol. 2, no. 4 (14), pp. 7–9.

60. Biscani F., Izzo D. A parallel global multiobjective framework for optimization: pagmo. *Journal of Open Source Software*, 2020, vol. 5 (53), p. 2338.
61. Huang B., Cheng R., Jin Y., Tan K.C. *Evox: a distributed GPU-accelerated library towards scalable evolutionary computation*. arXiv:2301.12457, 2023.
62. Weßner J., Berlich R., Schwarz K., Lutz M.F. Parametric optimization on HPC clusters with Geneva. *Computing and Software for Big Science*, 2023, vol. 7 (1), p. 4.
63. Deb K., Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, vol. 6 (2), pp. 182–197. DOI: 10.1109/4235.996017.
64. Biegler L.T., Zavala V.M. Large-scale nonlinear programming using IPOPT: an integrating framework for enterprise-wide dynamic optimization. *Computers & Chemical Engineering*, 2009, vol. 33 (3), pp. 575–582.
65. Johnson S.G. *The NLOpt nonlinear-optimization package*. Available at: <http://github.com/stevengj/nlopt> (accessed 30.11.2023).
66. Bonami P., Biegler L.T., Conn A.R., Cornuéjols G., Grossmann I.E., Laird C.D., Lee J., Lodi A., Margot F., Sawaya N., Wächter A. An algorithmic framework for convex mixed integer nonlinear programs. *Discrete Optimization*, 2008, vol. 5 (2), pp. 186–204.
67. Kovács P. Minimum-cost flow algorithms: an experimental evaluation. *Optimization Methods and Software*, 2015, vol. 30 (1), pp. 94–127.
68. *What is In-Memory Data Grid*. (In Russian). Available at: <https://habr.com/ru/post/160517/> (accessed 30.11.2023).
69. Edelev A.V., Sidorov I.A., Gorsky S.A., Feoktistov A.G. Large-scale analysis of the energy system vulnerability using an in-memory data grid. *ICCS-DE 2020. Proceedings of the 2nd International Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments*, Irkutsk, Russia. *CEUR-WS Proceedings*, 2020, vol. 2638, pp. 89–98.
70. Jablonsky J. MS Excel based software support tools for decision problems with multiple criteria. *Procedia Economics and Finance*, 2014, vol. 12, pp. 251–258.

Для цитирования:

Еделева А.В., Береснева Н.М., Костромин Р.О. Методика выбора алгоритмов оптимизации живучести энергетических инфраструктур // Системы анализа и обработки данных. – 2023. – № 4 (92). – С. 97–129. – DOI: 10.17212/2782-2001-2023-4-97-129.

For citation:

Edelev A.V., Beresneva N.M., Kostromim R.O. Metodika vybora algoritmov optimizatsii zhivuchesti energeticheskikh infrastruktur [A methodology for selecting algorithms for optimizing the resilience of energy infrastructures]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2023, no. 4 (92), pp. 97–129. DOI: 10.17212/2782-2001-2023-4-97-129.