

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 51-7:519.688

EDN: QYXHRQ

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-1-124-138



Коррекция элементов мутантных векторов метода дифференциальной эволюции при решении задачи минимизации дефицита мощности электроэнергетических систем

Д.В. Якубовский^{1✉}, Д.С. Крупенёв², Д.А. Бояркин³¹⁻³Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия

Резюме. Цель – повышение эффективности численных методов оптимизации в рамках расчетов задач минимизации дефицита мощности электроэнергетических систем, а именно метода дифференциальной эволюции и его вариаций – адаптивной aDE и самонастраивающейся jDE. Экспериментальные исследования и апробация предложенных корректировок проводились на электроэнергетических системах разной размерности со сложной структурой. Данные системы представляются и реализуются математическими моделями минимизации дефицита мощности с возможностью их анализа в рамках оценки балансовой надежности с помощью разработанного программного комплекса. В процессе проведенного анализа составляющих метода дифференциальной эволюции и существующих вариантов работы процесса мутации было обнаружено, что имеющиеся подходы данного процесса могут быть дополнительно изменены. Это впоследствии может повысить скорость решения задач. Показано, что основные изменения включают в себя дополнительную проверку соответствия мутантных векторов верхним и нижним ограничениям, а в случае их несоответствия рассматриваются три варианта коррекции. Существующие подходы предлагают формирование новых элементов вектора, выходящих за пределы ограничений, за счет применения случайных чисел в рамках ограничений. Авторами предлагается использовать «проекции» найденных элементов вектора, т.е. использование значений верхних или нижних ограничений при их нарушении для конкретного элемента в качестве значений мутантного вектора. Показано, что реализованный метод с использованием коррекции элементов мутантных векторов имеет преимущество в виде снижения времени решения задач на 47% в сравнении с существующими способами коррекции при сохранении той же точности. Показано, что наиболее эффективными вариациями для решения поставленных задач являются aDE и jDE. Полученные результаты экспериментальных исследований подтверждают эффективность и преимущества применения предложенного авторами способа корректировки в процессе мутации в виде «проекций», а также использования aDE и jDE вариаций метода дифференциальной эволюции для решения задач минимизации дефицита мощности электроэнергетических систем.

Ключевые слова: минимизация дефицита мощности, дифференциальная эволюция, мутантный вектор, электроэнергетическая система

Благодарности: Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2023-0003) программы фундаментальных исследований РФ на 2023–2030 гг. с использованием ресурсов ЦКП «Высокотемпературный контур» (Минобрнауки России, проект № 13. ЦКП.21.0038).

Для цитирования: Якубовский Д.В., Крупенёв Д.С., Бояркин Д.А. Коррекция элементов мутантных векторов метода дифференциальной эволюции при решении задачи минимизации дефицита мощности электроэнергетических систем // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 1. С. 124–138. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-124-138>. EDN: QYXHRQ.

POWER ENGINEERING

Original article

Adjustment of mutant vector elements in the differential evolution method for solving the problem of power shortage minimization in electric power systems

Dmitrii V. Yakubovskii^{1✉}, Dmitry S. Krupenev², Denis A. Boyarkin³¹⁻³Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

© Якубовский Д.В., Крупенёв Д.С., Бояркин Д.А., 2024

Abstract. The article is aimed at increasing the effectiveness of numerical optimization methods in calculations of problems concerning power shortage minimization in electric power systems, specifically the differential evolution (DE) method and its variations—aDE and jDE. Experimental studies and testing of the proposed adjustments were carried out on complex electric power systems of different order. These systems are represented and realized by means of mathematical models of power shortage minimization with the possibility of their analysis using the developed software package as part of adequacy assessment. The performed analysis of the DE method elements and the existing variants of the mutation process revealed that the existing approaches can be further modified. This can subsequently increase the speed of problem-solving. It is shown that the main changes include an additional check that the mutant vectors meet the upper and lower bounds, and if they fail to do so, three adjustment options are considered. Existing approaches propose to generate new vector elements beyond the bounds by applying random numbers within the bounds. The present authors propose to use the “projections” of the found vector elements, i.e., to use the values of upper or lower bounds when they are exceeded for a particular element as mutant vector values. The implemented method involving the adjustment of mutant vector elements is shown to offer an advantage of a 47% reduction in problem-solving time over existing adjustment methods while maintaining the same accuracy. It is noted that aDE and jDE are the most effective variations for solving stated problems. The obtained results of experimental studies confirm the effectiveness and advantages of applying the proposed adjustment method in mutation process of in the form of “projections”, as well as using aDE and jDE variations of the DE method to solve the problems of power shortage minimization in electric power systems.

Keywords: power shortage minimization, differential evolution, mutation vector, electric power system

Acknowledgements: The research was carried out under the State Assignment Project (no. FWEU-2023-0003) of the Fundamental Research Program of the Russian Federation for the period 2023-2030 using the resources of the High-Temperature Circuit Multi-Access Research Center (Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project no 13. ЦКП.21.0038).

For citation: lakubovskii D.V., Krupenev D.S., Boyarkin D.A. Adjustment of mutant vector elements in the differential evolution method for solving the problem of power shortage minimization in electric power systems. *iPolytech Journal*. 2024;28(1):124-138. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-124-138>. EDN: QYXHRQ.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из существенных задач в области энергетики является своевременная оценка и обеспечение требуемого уровня балансовой надежности. Данные задачи обязательно должны решаться в непрерывно и динамично развивающихся и усложняющихся электроэнергетических системах (ЭЭС). Одной из решаемых задач при обеспечении требуемого уровня балансовой надежности является обоснование уровня резервов различных видов в ЭЭС и определение необходимых поправок в планах по вводу новых и выводу устаревших или аварийных элементов ЭЭС. Вычислительно такие задачи по расчету обеспечения резервов мощности имеют большую размерность, поэтому модернизация математических методов оценки балансовой надежности необходима для обеспечения точности и скорости получаемых решений.

Основным используемым методом оценки балансовой надежности является метод статистических испытаний (Монте-Карло)^{4,5} [1–7]. Оценка балансовой надежности на его основе включает в себя следующие этапы: на первом осуществляется формирование случайных расчетных состояний ЭЭС для каждого часа периода оценки; на втором – формирование задачи на основе математической модели минимизации дефицита мощности (МДМ) и ее решение методами оптимизации для каждого сформированного состояния; на третьем – результаты второго этапа анализируются и проводится вычисление комплекса показателей балансовой надежности (ПБН).

На сегодняшний день в области оценки балансовой надежности одним из актуальных направлений исследований является улучшение соответствия математических моделей МДМ реальным условиям эксплуатации и применение более эффективных численных методов оптимизации. В рамках работы был проанализирован ряд различных программных комплексов для оценки балансовой надежности [8–10], таких как ANTARES^{6,7}. Оценка надежности передачи крупномасштабных систем TRELSS [11–13], Power Technologies International PSS[®] E OPF, TPLAN компании Siemens^{8–11}[14], CORAL¹² [8, 9]. Оценка рисков надежности и адек-

⁴Розанов М.Н. Надежность электроэнергетических систем: справочник. М.: Энергоатомиздат, 2000. Т. 2. 568 с.

⁵Антонов Г.Н., Зоркальцев В.И., Кривоуцкий Л.Д., Малащенко Ю.Е., Руденко Ю.Н. Надежность систем энергетики и их оборудования: справочник по общим моделям анализа и синтеза надежности систем энергетики. М.: Энергоатомиздат, 1994. Т. 1. 480 с.

ватности сети GRARE¹³, PLEXOS¹⁴, Многозонное моделирование надежности MARS, MAPS [15–17], GridView¹⁴, NARP [8], MARELI; а также «ОРИОН-М», «ПОТОК-3», «ЯНТАРЬ» [18] и «Надежность». Большинство комплексов проводят расчеты, пользуясь потоковыми (GRARE, CORAL, «ПОТОК-3»), линейными или линеаризованными моделями. Некоторые комплексы работают с моделями минимизации затрат, что отличается от оригинальной задачи минимизации дефицита мощности и, в свою очередь, ставит под сомнение полученные решения в рамках оценки балансовой надежности. Также важным замечанием является то, что модели минимизации дефицита мощности ЭЭС с учетом линейных потерь при перетоках мощности (которые применяются в обозначенных комплексах) содержат допущения, связанные с учетом неполного объема потерь при передаче энергии. Ранее в [5] и [18] было показано, что модели с квадратичными потерями корректнее отражают работу реальных ЭЭС и близки к ним по физическому смыслу.

Учитывая специфику применяемых моделей и сформулированных задач на их основе, в каждом анализируемом программном комплексе применяются соответствующие методы оптимизации. Например, метод Зауэра (Sauer) является поточным и решает задачи в комплексе GRARE, где используются линеаризованные модели. Аналогично метод Форда-Фалкерсона ранее использовался в программном комплексе «ПОТОК» для решения задач. Кроме того, в других программных комплексах для решения линейных задач применяются симплекс-методы, а также линейные решатели и системы моделирования, такие как GAMS и CPLEX. МДМ, в свою очередь, меняются, усложняются и линеаризуются. В некоторых программных комплексах для их решения используются различные реализации метода внутренних точек и нелинейные решатели из обозначенных систем моделирования высокого уровня.

Авторами были проведены исследования разработанных математических моделей МДМ и методов решения задач на их основе [19–22]. По результатам проведенных исследований выявлено, что существующие математические модели формируют многоэкстремальные задачи, в связи с чем было решено использовать метод дифференциальной эволюции. В ходе экспериментов метод дифференциальной эволюции показывал стабильные результаты работы, где все полученные решения для различных конфигураций ЭЭС были идентичны полученным решениям математического пакета GAMS, решателя CONOPT.

В работе представлено исследование применения модификаций по корректировке результатов блока мутации в различных версиях метода дифференциальной эволюции с учетом нескольких стратегий мутации.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В расчетах для МДМ используется имитационное моделирование ЭЭС и методы оптимизации для решения задач на их основе. Такой подход позволяет определить дефицит мощности для каждого из рассматриваемых состояний системы. Разработка моделей и применение различных методов оптимизации происходили в непрерывном процессе.

На текущий момент разработаны модели МДМ, которые различаются в учете особенностей функционирования ЭЭС. Это непосредственно влияет на адекватность определения уровня дефицита мощности и других показателей надежности, а также на сложность представления энергосистемы.

⁶Antares. Optimization problems formulation. 2017. P. 2/15–15/15. Режим доступа: <https://antares-simulator.org/media/files/page/UC4V8-170522-Antares-Optimization-Problems-Formulation.pdf> (дата обращения: 04.02.2023).

⁷RTE Antares, Modelling of flow-based domains in Antares for adequacy studies. 2017. P. 1/37–36/37. Режим доступа: <https://antares-simulator.org/media/files/page/ZHX0N-171024-Rte-Modelling-of-Flow-Based-Domains-in-Antares-for-Adequacy-Studies.pdf> (дата обращения: 04.02.2023).

⁸Model management module for PSS®E // Siemens Power Technologies International. 2020. Режим доступа: https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:cff6e4a4-5776-4a0a-8c50-283c0aa6a761/pss-e-ModelManagementModule-datasheet-EN-v2-0_original.pdf (дата обращения: 07.02.2023).

⁹Optimal Power Flow PSS®E // Siemens Power Technologies International. 2014. Режим доступа: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:27e9879f51bca33eea4616f85925b1ae69286bf2/pti-ff-en-swpe-optpowflow-1412.pdf> (дата обращения: 07.02.2023).

Основная идея заключается в формировании задачи на основе модели МДМ, используя данные, полученные после создания конкретных случайных состояний системы, и далее происходит оптимизация этих состояний, где определяются минимумы дефицита мощности. В математических моделях должны быть определены параметры, такие как мощности генераторов и нагрузок для всех зон надежности, пропускные способности связей и коэффициенты потерь мощности при ее передаче. Общая задача состоит в поиске распределения мощности в системе при учете минимума дефицита мощности с возможностью обеспечения максимально возможного покрытия нагрузки с учетом баланса мощности в зонах надежности для каждого конкретного сформированного состояния. Важно также максимально соответствовать физическим процессам потокораспределения для получения объективной картины работы системы в конкретных режимах.

В итоге исследуются методы решения задачи МДМ в нелинейном виде, которая содержательно может быть сформулирована следующим образом [5]: «Необходимо получить оптимальное потокораспределение ЭЭС в рамках имеющихся известных параметров генерирующей мощности, уровней нагрузок потребителей, максимально допустимых перетоков и коэффициентов потерь мощности при ее передаче».

Формулировка проблемы, целевая функция:

$$\min_{y,x,z} \sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - y_i); \quad (1)$$

нелинейные балансовые ограничения, с квадратичными потерями при перетоках мощности:

$$x_i - y_i + \sum_{j=1}^n (1 - a_{ji} z_{ji}) z_{ji} - \sum_{j=1}^n z_{ij} = 0, i = 1, \dots, n; \quad (2)$$

верхние и нижние ограничения на переменные:

$$0 \leq y_i \leq \bar{y}_i, i = 1, \dots, n; \quad (3)$$

$$0 \leq x_i \leq \bar{x}_i, i = 1, \dots, n; \quad (4)$$

$$0 \leq z_{ij} \leq \bar{z}_{ij}, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n, i \neq j, \quad (5)$$

где **оптимизируемые параметры**: x_i – используемая генерирующая мощность в зоне надежности i , МВт; y_i – обеспечиваемая нагрузка потребителей в зоне надежности i , МВт; z_{ij} и z_{ji} – рассчитанные перетоки мощности по линиям электропередачи (ЛЭП) из зоны надежности i в зону надежности j и из зоны надежности j в зону надежности i соответственно, МВт;

установленные границы: \bar{x}_i – максимум генерирующей мощности в зоне надежности i , МВт; \bar{y}_i – максимум нагрузки в зоне надежности i , МВт; z_{ij} и z_{ji} – максимально допустимые перетоки мощности между зонами надежности i и j , а также j и i соответственно, МВт; a_{ji} – коэффициенты удельных потерь мощности при ее передаче из зоны надежности j в зону надежности i , $j \neq i$, $i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, n$.

¹⁰High-performance transmission planning and operations software for the power industry. PSS®E – Overview // Siemens. 2014. Режим доступа: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:480a532bff8def3f8531fff18f7ccf446001e685/siemenspti-software-psse-brochure-2017.pdf> (дата обращения: 25.06.2023).

¹¹PSR – Energy Consulting and Analytics. OPTGEN User Manual. Version 7.4. 2019. Режим доступа: <https://www.youtube.com/c/PSREnergyConsultingandAnalytics/videos> (дата обращения: 25.06.2023).

¹²Mid-term Adequacy Forecast 2018, Appendix 1: Methodology and Detailed Results // ENTSOE. 2018. 62 p. Режим доступа: https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/sdc-documents/MAF/MAF_2018_Methodology_and_Detailed_Results.pdf (дата обращения: 25.06.2023).

¹³Market Simulation Software. PLEXOS. Режим доступа: <https://energyexemplar.com/solutions/plexos> (дата обращения: 04.02.2023).

¹⁴Simulate security-constrained unit commitment and economic dispatch in large-scale transmission networks // ABB GridView. 2016. Режим доступа: https://library.e.abb.com/public/f556c940eb03414da5ea0f3671baef8c/GridView-brochure_9AKK106930A8192-A4-web.pdf?x-sign=ltHqZpuwLYeuRiOJCvtm90+45NMqCbktprV4PnyeQaE8g5PUUnKDEw1htqg80uguC (дата обращения: 25.06.2023).

Коэффициенты удельных потерь мощности в ЛЭП при ее передаче были определены в соответствии с [8, 10] и рассчитываются следующим образом:

$$a_{ji} = \frac{r_{ji}}{U_{\text{ном}}^2 \cos^2 \varphi_{ji}}, j = 1, \dots, J, i = 1, \dots, I, i \neq j, \quad (6)$$

где: r_{ji} – активное сопротивление линии электропередачи между зонами надежности j и i , Ом_км; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение ЛЭП между зонами надежности j и i , кВ; $\cos^2 \varphi_{ji}$ – усредненный коэффициент мощности межзонных связей между зонами надежности j и i (обычно принимается равным 0,9).

$$z_{ji} \cdot z_{ij} = 0, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n. \quad (7)$$

Модель (1)–(7) (далее М) является моделью потокораспределения мощности электроэнергетических систем и применяется в области оценки балансовой надежности. Эта модель может рассматриваться с точки зрения решения транспортной задачи. В основе модели лежит целевая функция минимизации дефицита мощности при учете балансовых ограничений равенств, которые вносят основной вклад при моделировании распределения активной мощности по узлам (зонам надежности). Также для корректного моделирования встречных перетоков мощности используется дополнительное ограничение (7), это позволяет внести однозначность в направление перетока мощности в каждом режиме работы системы.

Метод дифференциальной эволюции (от англ. differential evolution DE) – это популярный метаэвристический метод оптимизации, используемый для многомерных функций с действительными значениями [23–29]. Данный метод использует совокупность индивидуальных решений и относится к классу стохастических алгоритмов оптимизации при использовании некоторых идей генетических алгоритмов, однако не требует работы с переменными в бинарном коде.

Рассматриваемый метод DE в своей основе использует вычисления значений целевой функции и новых векторов решений, без необходимости вычисления ее производных. Это позволяет значительно сократить время расчетов, не требуя времязатратной процедуры дифференцирования на каждом шаге итерационного процесса.

На рис. 1 приведен псевдокод работы алгоритма дифференциальной эволюции. Основная идея состоит в поиске решений среди сформированных отдельных векторов, которые обновляются на каждой итерации (в данном случае поколении). Новые векторы (потенциальные решения) создаются путем комбинирования (мутации) существующих векторов в соответствии с подходящей стратегией мутации, последующим скрещиванием и выбором

```

Инициализация:
N = размерность задачи; NP = N*10;
F = rand (0.1, 1.0);
CR = rand (0.0, 1.0);
P_max = 50000;
G = 1;
PG = инициализация популяции случайными числами;
while (критерий останова не удовлетворен или G≠P_max) do
  best = определить лучший вектор
  for  $i$  with each individual  $x_G^i$  in PG do
     $x_G^{mut}$  = Мутация (Стратегия мутации, F,  $x_G^i$ , best)
     $u_G^i$  = Скрещивание (CR,  $x_G^i$ ,  $x_G^{mut}$ )
     $x_{G+1}^i$  = Выбор ( $x_G^i$ ,  $u_G^i$ )
  end for
  G = G+1
end while

```

Рис. 1. Псевдокод алгоритма метода дифференциальной эволюции
Fig. 1. Pseudocode of the differential evolution method algorithm

(селекцией). Кандидаты с наилучшими значениями целевой функции сохраняются в следующем поколении (итерации), постепенно улучшая ценность индивидов и формируя более жизнеспособные и подходящие популяции. Процесс повторяется до момента срабатывания критерия останова.

Метод учитывает верхние и нижние границы при вычислении новых особей (векторов с решениями) в популяции. Это достигается путем последовательного применения процессов мутации, скрещивания и выбора для каждого вектора популяции. Такой подход облегчает работу с целевой функцией, поскольку не требует дополнительных штрафных ограничений, что особенно полезно при решении задач с верхними и нижними ограничениями на переменные. В качестве стратегии мутации может быть выбран один из проверенных вариантов [25]:

$$\text{DE_rand_1 (DR1)} \quad (8)$$

$$\text{DE_best_1 (DB1)} \quad x_G^{mut} = x_G^{best} + F(x_G^{r1} - x_G^{r2}); \quad (9)$$

$$\text{DE_current to rand_1 (DCR1)} \quad x_G^{mut} = x_G^i + F(x_G^{r1} - x_G^i) + F(x_G^{r2} - x_G^{r3}); \quad (10)$$

$$\text{DE_current to best_1 (DCB1)} \quad x_G^{mut} = x_G^i + F(x_G^{best} - x_G^i) + F(x_G^{r1} - x_G^{r2}); \quad (11)$$

$$\text{DE_rand_2 (DR2)} \quad x_G^{mut} = x_G^{r1} + F(x_G^{r2} - x_G^{r3}) + F(x_G^{r4} - x_G^{r5}); \quad (12)$$

$$\text{DE_best_2 (DB2)} \quad x_G^{mut} = x_G^{best} + F(x_G^{r1} - x_G^{r2}) + F(x_G^{r3} - x_G^{r4}). \quad (13)$$

Данный подход позволяет уделять большее внимание наиболее сильной особи (вектору) в популяции, что может привести к более быстрому достижению решения или к снижению разнообразия популяции и застреванию в локальных минимумах. Из-за этого важно исследовать применимость различных стратегий (8)–(13) к конкретной задаче, чтобы выбрать наиболее эффективную.

Метод дифференциальной эволюции имеет множество различных вариантов его реализации, некоторые из них являются самонастраивающимися, что придает методу универсальность и позволяет классифицировать как группу методов, обладающих различными возможностями и характеристиками. Одним из исследуемых методов является jDE [27], особенностью которого является возможность самостоятельно определять векторы F_G и CR_G для каждого вектора в популяции; данные векторы в свою очередь распределяются по группам $F_{pool\ G}$ и $CR_{pool\ G}$, соответственно, а начальные настроечные параметры определяются как $F_l = 0,1$; $F_u = 0,9$; $\tau_{1m} = 0,1$; $\tau_{2m} = 0,1$. Указанный метод позволяет решать задачи быстрее, чем это делает стандартный метод дифференциальной эволюции, в тоже время тонкая или грубая настройка не обязательны, т.к. параметры рассчитываются в процессе решения самой задачи. Подбор параметров F и CR осуществляется в каждом новом поколении в соответствии со следующими условиями:

$$F_{pool\ G+1}^i = \begin{cases} F_l + \text{случ. знач. } (0,0,1,0)_1 \cdot F_u, & \text{если случ. знач. } (0,0,1,0)_2 < \tau_1, \\ F, & \text{в других случаях} \end{cases}$$

$$CR_{pool\ G+1}^i = \begin{cases} \text{случ. знач. } (0,0,1,0)_3, & \text{если случ. знач. } (0,0,1,0)_4 < \tau_2, \\ CR, & \text{в других случаях} \end{cases}$$

Еще одним вариантом реализации DE является метод aDE. Алгоритм, описанный в [28], имеет схожую логику вычислительного процесса с ранее описанным алгоритмом. Значения изначальных параметров устанавливаются в рамках такой же схемы, как и в jDE. Тем не менее существенные отличия претерпевают алгоритмы формирования новых параметров F и CR . Регулировка способа задания F и CR происходит с помощью значения среднего арифметического от значений целевых функций во всей популяции f_{avg} , таким образом подбор параметров F и CR происходит следующим образом:

$$F_{pool\ G+1}^i = \begin{cases} \text{if } f(x_G^i) < f_{avg}, \text{ then } F_{G+1}^i, \\ \text{else } rand(0.1, 1.0) \end{cases}$$

$$CR_{pool\ G+1}^i = \begin{cases} \text{if } f(x_G^i) < f_{avg}, \text{ then } CR_{G+1}^i \\ \text{else } rand(0.0, 1.0) \end{cases}$$

МОДИФИКАЦИЯ КОРРЕКЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ МУТАНТНЫХ ВЕКТОРОВ

Обычно варианты алгоритмов и методов дифференциальной эволюции непосредственно используют известные этапы мутации, скрещивания и (селекции) выбора, которые применяются к каждому вектору в популяции, а поколения из векторов циклически сменяются новыми. Однако при реализации этих методов не многие отклоняются от существующих описаний, что иногда приводит к узким местам и негативно сказывается на эффективности метода. Одним из таких узких мест можно считать блок мутации (рис. 2).

```

i – индекс целевого вектора в популяции;
while (r1 == i) do r1 = случ.число(NP – 1);
while (r2 == i или r2 == r1) do r2 = случ.число(NP – 1);
while (r3 == i или r3 == r2 или r3 == r1) do r3 = случ.число(NP – 1);
for j от 0 до N
     $x_{G,j}^{mut} = x_G^{r1} + F(x_G^{r2} - x_G^{r3});$ 
end for

```

Рис. 2. Псевдокод процесса мутации в алгоритме DE

Fig. 2. Mutation pseudocode in the differential evolution algorithm

Основой процедуры мутации является создание нового вектора мутанта путем случайного выбора векторов и следования стратегии мутации. Однако в специализированной литературе практически отсутствует анализ ситуации, когда элементы полученного вектора с мутациями выходят за определенные нижние и/или верхние границы.

В случае, когда решается задача минимизации дефицита мощности, в совокупности с методом DE применяется техника (метод перехода от условной задачи к безусловной) штрафных функций для работы с ограничениями. Этот метод многократно увеличивает значение целевой функции, если параметры выходят за пределы ограничений. В результате таких мутаций значительно возрастает число векторов в популяции, нарушающих ограничения, что существенно влияет на работу метода DE. В итоге полноценное решение задачи МДМ не достигается. Однако в случае решения безусловных задач, таких как определение минимума функции Розенброка, метод находит решение успешно.

Для обеспечения полноценной работы метода с задачами, основанными на модели *M*, и чтобы избежать решений, которые не соответствуют нижним $x_{G,j}^L$ и верхним $x_{G,j}^U$ ограничениям переменных, необходимо дополнить блок мутации. В данном случае вводится специальный этап, на котором происходит проверка соответствия сформированного элемента вектора мутанта заданным границам. В данной работе рассматривается всего три варианта формирования новых элементов, в том случае, если условие по границам во время проверки не выполняется.

В случае, показанном на рис. 3, далее – первый случай, значение вышедшего за границы элемента вычисляется с помощью генерации случайного числа в рамках верхней и нижней установленной границы. Это ограничение было предложено в алгоритме исследовательской работы в [28].

Путем сравнения времени работы данного способа контроля результата мутации и исходного варианта мутации были получены значения, которые показали, что дополнение контроля мутации ускорило поиск решения на 10–15%. Однако в другом источнике [29], а также в исходных кодах реализованного метода был обнаружен вариант с другим способом определения новых значений элементов вектора, тоже основанных на случайных числах (рис. 4). Новый элемент определяется следующим образом: вычисляется размер области возможных значений между верхними и нижними ограничениями, затем определяется случайное число от 0 до 1, которое

```

i – индекс целевого вектора в популяции;
while (r1 == i) do r1 = случ.число(NP – 1);
while (r2 == i или r2 == r1) do r2 = случ.число(NP – 1);
while (r3 == i или r3 == r2 или r3 == r1) do r3 = случ.число(NP – 1);

for j от 0 до N
     $x_{G,j}^{mut} = x_{G,j}^{r1} + F(x_{G,j}^{r2} - x_{G,j}^{r3});$ 
    if  $x_{G,j}^{mut} < x_{G,j}^L$  или  $x_{G,j}^U < x_{G,j}^{mut}$ 
         $x_{G,j}^{mut} = \text{случ.число}(x_{G,j}^L, x_{G,j}^U);$ 
    end if
end for
    
```

Рис. 3. Псевдокод варианта контроля результата мутации 1
 Fig. 3. Pseudocode of the control option for the mutation 1 result

умножается на полученное значение размера области и прибавляется к нижнему значению. Подобный подход является усложненной версией, обозначенной в алгоритме контроля результата мутации 1, и в алгоритмическом виде может быть представлен следующим образом (рис. 4).

```

i – индекс целевого вектора в популяции;
while (r1 == i) do r1 = случ.число(NP – 1);
while (r2 == i или r2 == r1) do r2 = случ.число(NP – 1);
while (r3 == i или r3 == r2 или r3 == r1) do r3 = случ.число(NP – 1);

for j от 0 до N
     $x_{G,j}^{mut} = x_{G,j}^{r1} + F(x_{G,j}^{r2} - x_{G,j}^{r3});$ 
    if  $x_{G,j}^{mut} < x_{G,j}^L$  или  $x_{G,j}^U < x_{G,j}^{mut}$ 
         $x_{G,j}^{mut} = x_{G,j}^L + (x_{G,j}^U - x_{G,j}^L) \text{случ.число}(0,1);$ 
    end if
end for
    
```

Рис. 4. Псевдокод варианта контроля результата мутации 2
 Fig. 4. Pseudocode of the control option for the mutation 2 result

```

i – индекс целевого вектора в популяции;
while (r1 == i) do r1 = случ.число(NP – 1);
while (r2 == i или r2 == r1) do r2 = случ.число(NP – 1);
while (r3 == i или r3 == r2 или r3 == r1) do r3 = случ.число(NP – 1);
for j от 0 до N
     $x_{G,j}^{mut} = x_{G,j}^{r1} + F(x_{G,j}^{r2} - x_{G,j}^{r3});$ 
    if  $x_{G,j}^{mut} < x_{G,j}^L$ 
         $x_{G,j}^{mut} = x_{G,j}^L;$ 
    else if  $x_{G,j}^U < x_{G,j}^{mut}$ 
         $x_{G,j}^{mut} = x_{G,j}^U;$ 
    end if
end for
    
```

Рис. 5. Псевдокод варианта контроля результата мутации 3
 Fig. 5. Pseudocode of the control option for the mutation 3 result

В качестве еще одного варианта коррекции контроля результата мутации (рис. 5) авторами предлагается следующий подход. В случае выхода значений полученных элементов вектора мутанта за пределы установленных верхних и нижних ограничений необходимо определить, какое из ограничений пересечено и установить на место элемента значение пересеченной границы. В данном случае используется практически оригинальный вектор, что должно повысить скорость работы метода в целом.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальные вычисления проводились для тестовых схем с тремя и семью зонами надежности (узлами), в качестве модели использовалась модель минимизации дефицита мощности с квадратичными потерями. На рис. 6 а обозначены параметры пропускных способностей линий для схемы с тремя узлами, где $C1 = 50$ МВт, $C2 = 5$ МВт, $C3 = 80$ МВт, а коэффициенты потерь $C1 = 0,000603255$, $C2 = 1,13037E-05$, $C3 = 0,000172891$.

На рис. 6 б обозначены линии для схемы с семью узлами, где пропускные способности $C12 = 360$ МВт, $C23 = 150$ МВт, $C24 = 200$ МВт, $C25 = 800$ МВт, $C45 = 1200$ МВт, $C56 = 300$ МВт, $C57 = 150$ МВт коэффициенты потерь $C12 = 0,000403555$, $C23 = 2,16047E-05$, $C24 = 0,00018299$, $C25 = 0,000225555$, $C45 = 1,14045E-05$, $C56 = 0,000522111$, $C57 = 0,000311655$.

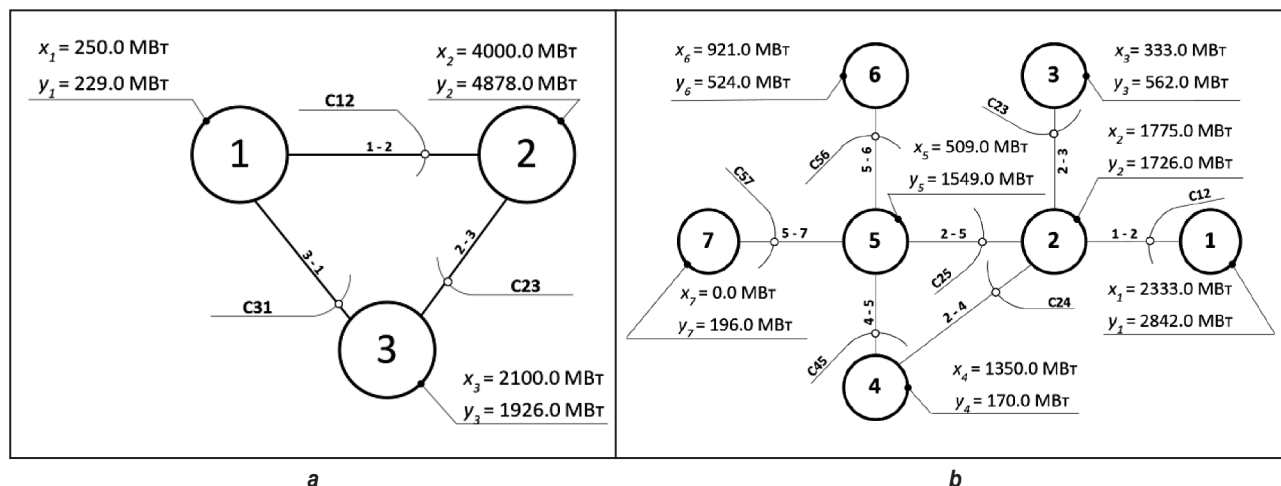


Рис. 6. Тестовые схемы экспериментальных систем: 3 узла (а), 7 узлов (б)
Fig. 6. Pilot circuits of experimental systems: 3 nodes (a), 7 nodes (b)

Анализ проводился на основании полученных расчетов, где каждый рассчитанный блок содержит в себе информацию о типе корректировки, стратегии мутации и модификации метода, где основная информация представлена временем расчетов (минимальное, максимальное и среднее значение для 25 расчетов). Итоговые результаты ранжировались по возрастанию для среднего значения времени расчета.

Цветовая схема определяет стабильность получаемых результатов, где темно-серым обозначены некорректные результаты с частыми попаданиями в локальные минимумы или отсутствием сходимости; светло-серым обозначены близкие к показателю минимума результаты, однако в которых также присутствуют близлежащие локальные минимумы; белым обозначены полностью стабильные, корректные, идентичные результаты. Наиболее показательными являются результаты работы метода для семиузловой системы, т.к. очень наглядно показывают разницу во времени выполнения оптимизации. В табл. 1 дополнительно выделены наилучшие связки видов контроля мутаций и стратегий мутаций, которые обозначены рамками и полужирным курсивным шрифтом.

Из результатов, представленных в табл. 1, можно сделать вывод, что для метода DE наиболее эффективными являются связки контроля мутации 3 и стратегии мутации DE_current to best_1 для трехузловых систем, которые показывают наименьшее время решения задачи с учетом получения корректных и стабильных дефицитов мощности для трехузловых систем. При решении задачи для семиузловых систем наилучшим образом себя проявили связки контроля мутации 3 и стратегии мутации DE_current to best_1.

По результатам расчетов модифицированным самонастраивающимся методом aDE, представленных в табл. 2, полученные значения показывают наибольшее преимущество в рамках использования 3-го типа корректировки мутации и стратегий мутации DE_rand_1 и DE_current to rand_1. Существенное снижение доходит до двух раз к ближайшему стабильному конкуренту корректировки мутации 2-го типа.

Таблица 1. Результаты расчетов для трех- и семиузловых систем методом DE

Table 1. Calculation results for three- and seven-node systems using the differential evolution (DE) method

3 узла				7 узлов			
Стратегия мутации / время работы (мс)	DE			Стратегия мутации / время работы (мс)	DE		
	min	max	avg		min	max	avg
B3_DB1	0	42	5	B3_DB1	0	695	215
B2_DB1	30	142	76	B3_DCB1	575	5317	2026
B1_DCB1	37	173	83	B2_DCB1	1254	6007	2612
B3_DCB1	20	415	109	B1_DCB1	1745	6534	3356
B1_DB1	63	275	128	B2_DCR1	1618	6451	3894
B2_DCB1	44	479	132	B1_DB1	1717	6337	4762
B3_DR1	175	285	224	B3_DR1	5317	6691	5382
B3_DB2	216	387	238	B3_DCR1	5423	5464	5435
B1_DCR1	172	490	252	B3_DR2	5510	5577	5533
B3_DCR1	122	447	299	B1_DR1	6217	6265	6240
B2_DR1	309	424	372	B2_DB1	6259	6972	6484
B2_DCR1	220	498	423	B1_DCR1	6492	6795	6562
B1_DR1	361	617	426	B2_DR1	6503	7640	6647
B3_DR2	416	469	432	B3_DB2	6874	7016	6917
B2_DB2	427	562	503	B1_DB2	7342	7809	7476
B1_DB2	539	569	549	B1_DR2	7609	7792	7658
B1_DR2	557	644	573	B2_DB2	7916	8173	8024
B2_DR2	559	632	585	B2_DR2	8494	8721	8539

Таблица 2. Результаты расчетов для трех- и семиузловых систем методом aDE

Table 2. Calculation results for three- and seven-node systems using a modified self-tuning aDE method

3 узла				7 узлов			
Стратегия мутации / время работы (мс)	aDE			Стратегия мутации / время работы (мс)	aDE		
	min	max	avg		min	max	avg
B3_DB1	0	24	7	B3_DB1	6	145	52
B1_DB1	11	32	18	B2_DB1	91	195	129
B2_DB1	10	50	23	B1_DB1	105	224	153
B3_DB2	40	83	40	B3_DB2	125	607	287
B1_DB2	28	106	59	B1_DB2	232	728	384
B2_DB2	30	142	70	B2_DB2	287	943	565
B3_DCB1	43	140	87	B3_DCB1	31	4571	2638
B3_DR1	40	183	106	B3_DR1	1565	5533	3077
B3_DR2	71	200	117	B3_DR2	1787	5742	3546
B2_DCB1	83	252	161	B3_DCR1	2086	5783	4773
B2_DR1	101	287	194	B2_DCB1	1956	6157	5180
B1_DR2	152	323	217	B1_DCB1	2570	6638	5548
B2_DR2	132	347	219	B2_DCR1	3889	6421	5571
B1_DCB1	111	487	257	B1_DR1	1356	6400	5574
B1_DCR1	162	403	276	B2_DR1	4984	6511	6280
B1_DR1	119	484	287	B1_DCR1	6159	6688	6614
B3_DCR1	159	473	329	B1_DR2	5752	7096	6790
B2_DCR1	166	522	369	B2_DR2	4857	7336	6832

Таблица 3. Результаты расчетов для трех- и семиузловых систем методом jDE
Table 3. Calculation results for three- and seven-node systems using a jDE method

3 узла	jDE			7 узлов	jDE		
Стратегия мутации \ время работы (мс)	min	max	avg	Стратегия мутации / время работы (мс)	min	max	avg
B3_DB1	0	238	25	B1_DB1	584	1708	850
B1_DB1	86	551	213	B3_DB1	11	2453	861
B2_DB1	111	538	250	B2_DB1	904	3109	1666
B3_DCB1	170	466	304	B3_DCB1	6082	6125	6096
B3_DB2	260	501	332	B3_DR1	6137	6195	6154
B2_DCB1	224	586	429	B3_DCR1	6231	6277	6248
B3_DR1	385	532	460	B3_DR2	6320	6374	6341
B1_DCB1	281	564	484	B2_DCR1	6618	6804	6719
B3_DCR1	495	536	510	B2_DCB1	6684	7044	6883
B3_DR2	497	547	520	B3_DB2	3926	7500	6889
B1_DR1	537	580	558	B2_DR1	6873	7228	7005
B1_DCR1	558	590	570	B1_DB2	3752	7954	7018
B2_DB2	274	637	572	B1_DCB1	7013	7309	7092
B2_DR1	559	590	575	B1_DCR1	7083	7489	7272
B2_DCR1	566	599	579	B1_DR1	7338	7531	7385
B1_DB2	494	622	592	B2_DB2	6368	7782	7617
B1_DR2	617	346	628	B1_DR2	7953	8102	8026
B2_DR2	622	697	651	B2_DR2	8412	9483	8620

Таблица 4. Итоговые результаты сравнения лучших результатов для каждого метода и вида контроля результата мутации

Table 4. Final comparison report of the best results for each method and type of mutation result control

Метод	Схема	Контроль результата мутации	Стратегия мутации	Лучший результат (мс)	Улучшение
Результаты расчетов для трехузловой системы					
DE	TC ₁	1	DE_current to rand_1	252	0%
DE	TC ₁	2	DE_rand_1	372	-47%
DE	TC ₁	3	DE_current to best_1	109	56%
aDE	TC ₁	1	DE_rand_2	217	0%
aDE	TC ₁	2	DE_current to best_1	161	26%
aDE	TC ₁	3	DE_current to best_1	87	60%
jDE	TC ₁	1	DE_current to best_1	484	0%
jDE	TC ₁	2	DE_current to best_1	429	12%
jDE	TC ₁	3	DE_current to best_1	304	38%
Результаты расчетов для семиузловой системы					
DE	TC ₂	1	DE_current to best_1	3356	0%
DE	TC ₂	2	DE_current to best_1	2612	23%
DE	TC ₂	3	DE_current to best_1	2026	40%
aDE	TC ₂	1	DE_rand_1	5574	0%
aDE	TC ₂	2	DE_current to best_1	5180	8%
aDE	TC ₂	3	DE_rand_1	3077	45%

Метод jDE показал худшие результаты по скорости работы как для трехузловых, так и для семиузловых систем, а стабильность его решений для семиузловых систем полностью отсутствовала. Тем не менее наилучшие преобладающие результаты (табл. 3) также показала связка контроля мутации 3-го типа и стратегии мутации DE_current to best_1. Ввиду отсутствия стабильных решений для семиузловых систем данный метод не был полноценно учтен в сравнении результатов работы с остальными связками и методами.

Итоговые результаты работы разных методов представлены в табл. 4. В ней показано наглядное сравнение всех методов и связок методов, исследованных в работе. Из табл. 4 видно, что наиболее эффективной можно считать связку контроля мутации 3 типа и стратегии мутации DE_current to best_1. В среднем ускорение получения решений данной связкой находится в пределах 47,8% по отношению к типу корректировки контроля мутации 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассматривалось применение методов дифференциальной эволюции, а именно – ее стандартный вариант, а также две самонастраивающиеся модифицированные версии aDE и jDE, с разными вариантами контроля корректировки и стратегиями мутации к решению задачи минимизации дефицита мощности электроэнергетических систем. Представленная задача является нелинейной (квадратичной) многоэкстремальной. Для эффективной работы методов дифференциальной эволюции при решении задач минимизации дефицита мощности и для исключения возникновения решений, которые не соответствуют нижним и верхним ограничениям по переменным, в блок мутации был добавлен дополнительный этап проверки соответствия полученного элемента вектора заданным ограничениям. Всего было рассмотрено три варианта модификации этого подхода. Для проведения эксперимента были использованы схемы трех- и семиузловые схемы электроэнергетических систем, где для каждой системы проводилось несколько испытаний – с каждым методом дифференциальной эволюции, с несколькими вариантами стратегии мутации, а также каждым вариантом корректировки контроля мутации. По результатам проведенных экспериментов наиболее эффективными связками для всех вариантов методов оказался третий предлагаемый тип корректировки контроля мутации, который позволил сократить время расчетов в среднем почти на 48% по сравнению с первым, ранее известным видом корректировки контроля мутации. Таким образом, намеченная цель работы была достигнута, а именно повысилась эффективность численных методов оптимизации для вариантов метода дифференциальной эволюции – адаптивного (aDE), самонастраивающегося (jDE) и стандартного (DE) в рамках решения задач минимизации дефицита мощности электроэнергетических систем. В дальнейших исследованиях планируется более подробное изучение специфики строящихся задач, основанных на имеющихся моделях с целью упрощения и снижения количества переменных для имеющихся вариантов методов дифференциальной эволюции.

Список источников

1. Billinton R., Allan R. Reliability evaluation of power systems. London: Plenum Press, 1996. 509 p.
2. Обоскалов В.П. Надежность обеспечения баланса мощности электроэнергетических систем. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2002. 210 с.
3. Ковалев Г.Ф., Лебедева Л.М. Модель оценки надежности электроэнергетических систем при долгосрочном планировании их работы // Электричество. 2000. № 11. С. 17–24.
4. Фокин Ю.А. Вероятностно-статистические методы в расчетах систем электроснабжения. М.: Энергоатомиздат, 1985. 210 с.
5. Ковалев Г.Ф., Лебедева Л.М. Надежность систем электроэнергетики: монография / отв. ред. Н.И. Воропай. Новосибирск: Наука, 2015. 224 с.
6. Ковалев Г.Ф., Лебедева Л.М. Комплекс моделей оптимизации режимов расчетных состояний при оценке надежности электроэнергетических систем. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2000. 74 с.
7. Зоркальцев В.И., Пержабинский С.М. Модель оценки дефицита мощности электроэнергетической системы // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Математика. 2010. Т. 3. Вып. 3 80–92. EDN: NDFVDJ.
8. Pourbeik P. Review of the current status of tools and techniques for risk-based and probabilistic planning in power systems. 2010. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/272482844_Review_of_the_Current_Status_of_Tools_and_Techniques_for_Risk-Based_and_Probabilistic_Planning_in_Power_Systems (дата обращения: 23.06.2023).

9. Carramolino F.B.R., Careri F., Kavvadias K., Gonzalez I.H., Zucker A., Peteves E. Systematic mapping of power system models // Expert survey, EUR 28875 EN. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017. 86 p. <https://doi.org/10.2760/422399>.
10. Antonopoulos G., Chondrogiannis S., Kanellopoulos K., Papaioannou I., Spisto A., Efthimiadis T., Fulli G. Assessment of underlying capacity mechanism studies for Greece // Expert survey, EUR 28611 EN. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017. 94 p. <https://doi.org/10.2760/51331>.
11. Gaikwad A., Agarwal S., Carden K., Wintermantel N., Meliopoulos S., Kumbale M. A study on probabilistic risk assessment for transmission and other resource planning. 2015. P. 1-1-D-139. Режим доступа: <https://pubs.naruc.org/pub.cfm?id=536DCE1C-2354-D714-5175-E568355752DD> (дата обращения: 23.06.2023).
12. Agudelo L.U. A novel method for the approximation of risk of blackout in operational conditions // Laboratoire Image, Signaux et Systèmes Intelligents. 2016. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/318119199_A_novel_method_for_the_Approximation_of_risk_of_Blackout_in_operational_conditions (дата обращения: 23.06.2023).
13. Papic M. Survey of tools for risk assessment of cascading outages // Panel Session on Cascading Failures (Detroit, July 24–28, 2011). Detroit: IEEE GM, 2011. 28 p.
14. Hong Ying-Yi, Lee Lun-Hui. Reliability assessment of generation and transmission systems using fault-tree analysis // Energy Conversion and Management. 2009. Vol. 50. Iss. 11. P. 2810–2817. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.06.026>.
15. Chu K. MARS Multi-Area Reliability Simulation, EOP – On Demand Feature. General Electric Company, 2014.
16. Jirutitijaroen P., Singh C. Reliability and cost tradeoff in multi-area power system generation expansion using dynamic programming and global decomposition // IEEE Transactions on power systems. 2006. Vol. 21. Iss. 3. P. 1432–1441. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2006.879248>.
17. McCalley J. Module PE.PAS.U21.5 Multiarea reliability analysis // Electrical & Computer Engineering. Iowa State University. 81 p.
18. Kovalev G.F., Lebedeva L.M. Reliability of power systems. Cham: Springer, 2019. 237 p.
19. Якубовский Д.В. Анализ моделей минимизации дефицита мощности при оценке балансовой надежности электроэнергетических систем // Системные исследования в энергетике: труды молодых ученых ИСЭМ СО РАН. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2018. Вып. 48. 131 с.
20. Iakubovskiy D.V., Krupenev D.S., Boyarkin D.A. An analysis of shortage minimization models to assess power system adequacy // Energy Systems Research. 2018. Vol. 1. No. 3. P. 25–32. <https://doi.org/10.25729/esr.2018.03.0003>.
21. Якубовский Д.В., Крупенёв Д.С., Бояркин Д.А. Модель минимизации дефицита мощности электроэнергетических систем с учётом ограничений по контролируемым сечениям // Системы анализа и обработки данных. 2023. № 2. С. 95–120. <https://doi.org/10.17212/2782-2001-2023-2-95-120>. EDN: EPTTBK.
22. Якубовский Д.В., Крупенёв Д.С., Бояркин Д.А. Применение двухэтапной оптимизации в модели потокораспределения при оценке балансовой надёжности ЭЭС // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 1. С. 85–95. <https://doi.org/10.25729/2413-0133-2019-1-07>. EDN: WSCRWE.
23. Storn R. Differential evolution research – trends and open questions // Advances in Differential Evolution. Studies in Computational Intelligence / eds. U.K. Chakraborty. Berlin: Springer, 2008. Vol. 143. P. 1–31. https://doi.org/10.1007/978-3-540-68830-3_1.
24. Opara K., Arabas J. Comparison of mutation strategies in differential evolution – a probabilistic perspective // Swarm and Evolutionary Computation. 2018. Vol. 39. P. 53–69. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2017.12.007>.
25. Abbas Q., Ahmad Ja., Jabeen H. The analysis, identification and measures to remove inconsistencies from differential evolution mutation variants // Biological Sciences and Biotechnology. 2023. Vol. 49. Iss. 3. P. 52–68. <https://doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.2017.43S.052>.
26. Georgioudakis M., Plevris V. A comparative study of differential evolution variants in constrained structural optimization // Frontiers in Built Environment. 2020. Vol. 6. <https://doi.org/10.3389/fbuilt.2020.00102>.
27. Noman N., Bollegala D., Iba H. An adaptive differential evolution algorithm // IEEE Congress of Evolutionary Computation (New Orleans, 5–8 June 2011). New Orleans: IEEE; 2011. P. 2229–2236. <https://doi.org/10.1109/CEC.2011.5949891>.
28. Пантелеев А.В., Дмитраков И.Ф. Применение метода дифференциальной эволюции для оптимизации параметров аэрокосмических систем // Электронный журнал «Труды МАИ». 2010. № 37. Режим доступа: <https://trudymai.ru/upload/iblock/f49/primeneniye-metoda-differentsialnoy-evolyutsii-dlya-optimizatsii-parametrov-aerokosmicheskikh-sistem.pdf> (дата обращения: 23.06.2023).
29. Feoktistov V. Differential evolution // Search of solutions. Berlin/Heidelberg: Springer, 2006. Vol. 5. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-36896-2>.

References

1. Billinton R., Allan R. Reliability evaluation of power systems. London: Plenum Press; 1996, 509 p.
2. Oboskalov V.P. *Reliable provision of electric power system energy balance*. Yekaterinburg: Yekaterinburg Ural State Technical University; 2002, 210 p. (In Russ.).
3. Kovalev G.F., Lebedeva L.M. Model to estimate reliability of electric power systems under long-term planning of their operation. *Elektrichestvo*. 2000;11:17-24. (In Russ.).
4. Fokin Yu.A. *Probabilistic-statistical methods in power supply system calculations*. Moscow: Energoatomizdat; 1985, 210 p. (In Russ.).
5. Kovalev G.F., Lebedeva L.M. *Reliability of electric power systems*. Novosibirsk: Nauka; 2015, 224 p. (In Russ.).

6. Kovalev G.F., Lebedeva L.M. A set of models to optimize design state modes when assessing electric power system reliability. Irkutsk: Melentiev Energy Systems Institute SB RAS; 2000, 74 p. (In Russ.).
7. Zorkaltsev V.I., Perzhabinsky S.M. The model of power shortage evaluation of electrical power system. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Irkutsk State University. Series Mathematics*. 2010;3(3):80-92. (In Russ.). EDN: NDFVDJ.
8. Pourbeik P. Review of the current status of tools and techniques for risk-based and probabilistic planning in power systems. 2010. Available from: https://www.researchgate.net/publication/272482844_Review_of_the_Current_Status_of_Tools_and_Techniques_for_Risk-Based_and_Probabilistic_Planning_in_Power_Systems [Accessed 23th June 2023].
9. Carramolino F.B.R., Careri F., Kavvadias K., Gonzalez I.H., Zucker A., Peteves E. Systematic mapping of power system models. In: *Expert survey, EUR 28875 EN*. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2017, 86 p. <https://doi.org/10.2760/422399>.
10. Antonopoulos G., Chondrogiannis S., Kanellopoulos K., Papaioannou I., Spisto A., Efthimiadis T., Fulli G. Assessment of underlying capacity mechanism studies for Greece. In: *Expert survey, EUR 28611 EN*. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2017, 94 p. <https://doi.org/10.2760/51331>.
11. Gaikwad A., Agarwal S., Carden K., Wintermantel N., Melliopoulos S., Kumbale M. A study on probabilistic risk assessment for transmission and other resource planning. 2015. P. 1-1–D-139. Available from: <https://pubs.naruc.org/pub.cfm?id=536DCE1C-2354-D714-5175-E568355752DD> [Accessed 23th June 2023].
12. Agudelo L.U. A novel method for the approximation of risk of blackout in operational conditions // *Laboratoire Image, Signaux et Systèmes Intelligents*. 2016. Available from: https://www.researchgate.net/publication/318119199_A_novel_method_for_the_Approximation_of_risk_of_Blackout_in_operational_conditions [Accessed 23th June 2023].
13. Papic M. Survey of tools for risk assessment of cascading outages. In: *Panel Session on Cascading Failures*. 24–28 July 2011, Detroit. Detroit: IEEE GM; 2011, 28 p.
14. Hong Ying-Yi, Lee Lun-Hui. Reliability assessment of generation and transmission systems using fault-tree analysis. *Energy Conversion and Management*. 2009;50(11):2810-2817. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.06.026>.
15. Chu K. *MARS multi-area reliability simulation, EOP – on demand feature*. General Electric Company; 2014.
16. Jirutitijaroen P., Singh C. Reliability and cost tradeoff in multi-area power system generation expansion using dynamic programming and global decomposition. *IEEE Transactions on power systems*. 2006;21(3):1432-1441. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2006.879248>.
17. McCalley J. Module PE.PAS.U21.5 Multiarea reliability analysis. *Electrical & Computer Engineering*. Iowa State University. 81 p.
18. Kovalev G.F., Lebedeva L.M. *Reliability of power systems*. Cham: Springer; 2019, 237 p.
19. Iakubovskii D.V. Analysis of power shortage minimization models under electric power system balance reliability assessment. In: *Sistemnye issledovaniya v energetike: trudy molodykh uchenykh ISEM SO RAN = System research in energy: works of young scientists of MESI SB RAS*. Melentiev Energy Systems Institute SB RAS. Irkutsk: Melentiev Energy Systems Institute SB RAS; 2018, Iss. 48, 131 p. (In Russ.).
20. Iakubovskii D.V., Krupenev D.S., Boyarkin D.A. An analysis of shortage minimization models to assess power system adequacy. *Energy Systems Research*. 2018;1(3):25-32. <https://doi.org/10.25729/esr.2018.03.0003>.
21. Iakubovskii D.V., Krupenev D.S., Boyarkin D.A. A minimization model of the power shortage of electric power systems with regard to restrictions on controlled sections. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*. 2023;2:95-120. (In Russ.). <https://doi.org/10.17212/2782-2001-2023-2-95-120>. EDN: EPTTBK.
22. Iakubovskii D.V., Krupenev D.S., Boyarkin D.A. Application of two-stage optimization in the power flow distributing model while assessing the adequacy of electric power systems. *Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management*. 2019;1:85-95. (In Russ.). <https://doi.org/10.25729/2413-0133-2019-1-07>. EDN: WSCRWE.
23. Storn R. Differential evolution research – trends and open questions. In: Chakraborty U.K. (eds.). *Advances in Differential Evolution. Studies in Computational Intelligence*. Berlin: Springer; 2008, vol. 143, p. 1-31. https://doi.org/10.1007/978-3-540-68830-3_1.
24. Opar K., Arabas J. Comparison of mutation strategies in differential evolution – a probabilistic perspective. *Swarm and Evolutionary Computation*. 2018;39:53-69. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2017.12.007>.
25. Abbas Q., Ahmad Ja., Jabeen H. The analysis, identification and measures to remove inconsistencies from differential evolution mutation variants. *Biological Sciences and Biotechnology*. 2023;49(3):52-68. <https://doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.2017.43S.052>.
26. Georgioudakis M., Plevris V. A comparative study of differential evolution variants in constrained structural optimization. *Frontiers in Built Environment*. 2020;6. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2020.00102>.
27. Noman N., Bollegala D., Iba H. An adaptive differential evolution algorithm. In: *IEEE Congress of Evolutionary Computation*. 5–8 June 2011, New Orleans. New Orleans: IEEE; 2011, p. 2229-2236. <https://doi.org/10.1109/CEC.2011.5949891>.
28. Panteleev A.V., Dmitrakov I.F. Primenenie metoda differentsial'noj evolyucii dlya optimizatsii parametrov aerokosmicheskikh sistem. Application of the differential evolution method to optimize aerospace system parameters. *Elektronnyy zhurnal "Trudy MAI"*. 2010;37. Available from: <https://trudymai.ru/upload/iblock/f49/primenenie-metoda-differentsialnoy-evolyutsii-dlya-optimizatsii-parametrov-aerokosmicheskikh-sistem.pdf> [Accessed 23th June 2023].
29. Feoktistov V. Differential evolution. *Search of solutions*. Berlin/Heidelberg: Springer; 2006, vol. 5. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-36896-2>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Якубовский Дмитрий Викторович,

К.Т.Н.,

младший научный сотрудник Лаборатории
надёжности топливо- и энергоснабжения № 32,
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева
СО РАН,

664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия

✉ yakubovskii.dmit@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8331-6200>**Крупенёв Дмитрий Сергеевич,**

К.Т.Н.,

старший научный сотрудник,
заведующий Лабораторией
надёжности топливо- и энергоснабжения № 32,
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева
СО РАН,

664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия

krupenev@isem.irk.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3093-4483>**Бояркин Денис Александрович,**

К.Т.Н.,

младший научный сотрудник Лаборатории
надёжности топливо- и энергоснабжения № 32,
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева
СО РАН,

664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия

denisboyarkin@isem.irk.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7048-2848>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitrii V. Yakubovskii,

Cand. Sci. (Eng.),

Junior Researcher of the Fuel and Energy Supply
Reliability Laboratory No. 32,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia

✉ yakubovskii.dmit@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8331-6200>**Dmitry S. Krupenev,**

Cand. Sci. (Eng.),

Senior Researcher,
Head of the Fuel and Energy Supply Reliability Laboratory
No.32,

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,

130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia

krupenev@isem.irk.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3093-4483>**Denis A. Boyarkin,**

Cand. Sci. (Eng.),

Junior Researcher of the Fuel and Energy Supply
Reliability Laboratory No. 32,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia

denisboyarkin@isem.irk.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7048-2848>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку
публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный
вариант рукописи.*

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 23.05.2023 г.; одобрена
после рецензирования 20.06.2023 г.; принята к публи-
кации 18.07.2023 г.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

*The final manuscript has been read and approved by all
the co-authors.*

Information about the article

The article was submitted 23.05.2023; approved after
reviewing 20.06.2023; accepted for publication 18.07.2023.