

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-4-341-354>

УДК 621.311

## Оптимизация топологии сети с ВИЭ-генерацией на основе модифицированного адаптированного генетического алгоритма

А. М. Брамм<sup>1)</sup>, А. И. Хальясмаа<sup>1, 2)</sup>, С. А. Ерошенко<sup>1, 2)</sup>, П. В. Матренин<sup>2)</sup>,  
Н. А. Попкова<sup>3)</sup>, Д. А. Секацкий<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина» (Екатеринбург, Российская Федерация),

<sup>2)</sup>ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» (Новосибирск, Российская Федерация),

<sup>3)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022  
Belarusian National Technical University, 2022

**Реферат.** В статье представлен разработанный авторами адаптивный генетический алгоритм, позволяющий оптимизировать топологию электрической сети с распределенной генерацией на основе биоинспирированных методов. Объекты исследования – 15-узловая схема электрической сети с фотоэлектрическими станциями и 14-узловая дополненная схема IEEE с источниками распределенной генерации (три ветровые и две фотоэлектрические станции). Моделирование режимов электроэнергетических систем выполнено с использованием находящейся в открытом доступе библиотеки Pandapower для языка программирования Python. Рассмотрены три типа электрической нагрузки потребителей, отражающие характер потребления электроэнергии в узлах реальных электроэнергетических систем, приведены результаты численных исследований. В предложенном генетическом алгоритме применены две различные функции скрещивания, функции мутации, отбора лучших индивидов и массовой мутации (полного обновления популяции). В конце каждой итерации работы алгоритма выводятся статистические зависимости, характеризующие его работу: лучшая (минимальные потери) и средняя приспособленность в популяции, список лучших индивидов на протяжении всех итераций и т. д. Верификация производилась в сравнении с результатами, полученными методом полного перебора возможных радиальных конфигураций системы, и показала, что разработанный генетический алгоритм обладает быстрой сходимостью, высокой точностью и способен корректно работать при различных конфигурациях схем электрических сетей, структурах генерации и нагрузки. Алгоритм может применяться совместно с системами прогнозирования ВИЭ-генерации на сутки вперед при планировании режимов работы энергообъединений с целью минимизации издержек на покрытие потерь электроэнергии и улучшения качества отпускаемой электроэнергии.

**Ключевые слова:** распределенная генерация, оптимизация режимов, генетический алгоритм, солнечная энергетика, метаэвристические методы, реструктуризация, распределительная сеть, потери электроэнергии, график нагрузки

**Для цитирования:** Оптимизация топологии сети с ВИЭ-генерацией на основе модифицированного адаптированного генетического алгоритма / А. М. Брамм [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 4. С. 341–354. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-4-341-354>

---

### Адрес для переписки

Секацкий Дмитрий Александрович  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65/2,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 292-65-82  
dsekatski@gmail.com

### Address for correspondence

Sekatski Dzmitry A.  
Belarusian National Technical University  
65/2, Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 292-65-82  
dsekatski@gmail.com

---

## Topology Optimization of the Network with Renewable Energy Sources Generation Based on a Modified Adapted Genetic Algorithm

A. M. Bramm<sup>1)</sup>, A. I. Khalyasmaa<sup>1, 2)</sup>, S. A. Eroshenko<sup>1, 2)</sup>, P. V. Matrenin<sup>2)</sup>,  
N. A. Papkova<sup>3)</sup>, D. A. Sekatski<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin  
(Ekaterinburg, Russian Federation),

<sup>2)</sup>Novosibirsk State Technical University (Novosibirsk, Russian Federation),

<sup>3)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The article presents an adaptive genetic algorithm developed by the authors, which makes it possible to optimize the topology of a power network with distributed generation. The optimization was based on bioinspired methods. The objects of the study was a 15-node circuit of a power network with photovoltaic stations and a 14-node IEEE augmented circuit with distributed generation sources (three wind farms and two photovoltaic plants). The simulation of the modes of electric power systems was performed using the Pandapower library for the Python programming language, which is in the public domain. Three types of electric load of consumers were considered, reflecting the natures of electricity consumption in the nodes of real electric power systems, the results of numerical studies were presented. The proposed genetic algorithm used two different functions of interbreeding, the function of mutation, selection of the best individuals and mass mutation (complete population renewal). At the end of each iteration of the algorithm operation, statistical dependencies were derived that characterized its work: the best (minimal losses) and average adaptability in the population, a list of the best individuals throughout all iterations, etc. The verification was carried out in comparison with the results obtained by a complete search of possible radial configurations of the system, and it showed that the developed genetic algorithm had fast convergence, high accuracy and was able to work correctly with different configurations of electrical circuits, generation and load structures. The algorithm can be used in conjunction with renewable energy sources generation forecasting systems for the day ahead when planning the operating modes of power units in order to minimize the costs of covering electricity losses and improve the quality of electricity supplied.

**Keywords:** distributed generation, mode optimization, genetic algorithm, solar energy, metaheuristic methods, restructuring, distribution network, power losses, load curve

**For citation:** Bramm A. M., Khalyasmaa A. I., Eroshenko S. A., Matrenin P. V., Papkova N. A., Sekatski D. A. (2022) Topology Optimization of the Network with Renewable Energy Sources Generation Based on a Modified Adapted Genetic Algorithm. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (4), 341–354. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-4-341-354> (in Russian)

### Введение

Широкое использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) ведет к появлению принципиально новых задач оптимизации при проектировании и управлении в электроэнергетике. Это обусловлено стохастическим характером ВИЭ-генерации и переходом на децентрализованные двунаправленные системы электроснабжения, в которых переток мощности может изменять свое направление, в отличие от централизованных систем с однонаправленной передачей электроэнергии от производителя к потребителям. В таких системах в каждый час суток имеется свой оптимальный вариант радиальной конфигурации (топологии) сети, обеспечивающий минимальные потери в линиях электропередачи.

Поиском оптимальной топологической структуры электрической сети по различным критериям занимаются многие исследователи [1–4].

В настоящее время для решения этой проблемы используют алгоритмы оптимизации, которые могут применяться в различных режимах работы энергосистемы, в том числе приближенных к реальному времени. Однако большое число комбинаций и ограничения по времени принятия решений существенно затрудняют использование классических методов оптимизации (таких как направленный перебор), а комбинаторная природа задачи не позволяет применять градиентные методы.

Генетический алгоритм (ГА) показывает свою эффективность в большинстве прикладных задач расчета оптимальной структуры электрических сетей, в том числе с учетом потребительских энергоисточников [5].

Наиболее важный аспект в использовании ГА – определение способа кодирования решения в виде хромосомы. В классическом подходе популяция может иметь хромосомы, представляющие недопустимые решения, их функциям приспособленности присваиваются соответствующие штрафные значения. Однако поскольку генетические операторы мутации и скрещивания должны формировать решения, имеющие смысл с точки зрения задачи, в данной работе предлагается обеспечить однозначное соответствие кодирования и декодирования, а в качестве хромосом использовать зашифрованную двоичным кодом топологию сети. Разработанный алгоритм обеспечивает отсутствие циклов в графе, чтобы система оставалась радиальной. Если при генерации начальной популяции или в результате скрещивания формируется топология с циклом, она отбрасывается, так что процесс генерации начальной и каждой последующей популяции выполняется до тех пор, пока популяция не будет заполнена допустимыми решениями.

### Основная часть

Современные тенденции развития промышленности и акцент на зеленых технологиях способствуют широкому использованию ВИЭ и активных распределительных сетей. Согласно годовым отчетам Международного энергетического агентства (IEA) за 2017–2019 гг. [6], зафиксировано снижение инвестиций в строительство электрических сетей на 7 % в год при увеличении финансирования цифровизации распределительных сетей (технологии автоматического управления, мониторинга и цифровых двойников оборудования). Доля цифровизации и интеллектуализации сетей превысила 15 % от общих инвестиций в 2019 г.

Наиболее распространенным источником электроэнергии в активных распределительных сетях являются фотоэлектрические станции. По данным Международного агентства по возобновляемым источникам энергии (IRENA), на 2020 г. доля фотоэлектрических станций составила порядка 42 % от новой введенной мощности ВИЭ [7].

Серьезной проблемой при эксплуатации ВИЭ является стохастический характер их генерации. Данная особенность обуславливает высокую степень неопределенности при планировании режимов электроэнергетических систем (ЭЭС). В соответствии с изменением времени суток и погодных условий изменяется и режим работы ВИЭ, что влияет на перетоки мощности в сети. В отличие от централизованных ЭЭС, где переток мощности преимущественно однонаправленный, в энергосистемах с ВИЭ перетоки

в сети могут менять свое направление. Таким образом, одна выбранная топология сети оказывается не оптимальной для различных погодных условий и временных промежутков при оценке потерь мощности и недостаточной (избыточной) загрузке линий. Для оптимизации режимов систем с электростанциями на основе ВИЭ необходимо точное прогнозирование генерации. Достичь этого можно с помощью методов искусственного интеллекта [8–13].

В рамках настоящего исследования на каждый час суток определялась оптимальная конфигурация 15-узловой ЭЭС с двумя солнечными электростанциями установленной мощностью 1,8 и 2,5 МВт. Под оптимальной конфигурацией понимается совокупность включенных линий электропередачи (ЛЭП), обеспечивающих минимальный уровень потерь активной мощности в сети и допустимые параметры электрического режима (уровни напряжений в узлах сети, загрузка линий). Исходные данные – информация о структуре сети (сопротивление линий, характер нагрузки (табл. 1) и расположение электрических станций) и прогноз генерации электростанций. Топология сети представлена на рис. 1 (черным цветом показаны нормально включенные линии, красным – нормально отключенные).

Нагрузки ЭЭС представлены графиками электрических нагрузок потребителей трех типов (рис. 2) с явно выраженными базовыми и пиковыми областями, что отражает характер потребления электроэнергии в узлах реальных ЭЭС.

Таблица 1

**Параметры распределительной электрической сети**

**Power distribution network parameters**

Параметры линий					Параметры нагрузки			
Начало	Конец	Активное сопротивление, Ом	Реактивное сопротивление, Ом	Максимальный ток, А	Узел	Максимальная активная мощность, кВт	Максимальная реактивная мощность, квар	График нагрузки
1	2	1,35	1,32	265	2	44,1	44,99	1
2	3	1,17	1,14	265	3	70,1	71,44	1
3	4	0,84	0,82	265	4	40,0	142,82	2
4	5	1,20	1,02	298	5	44,1	44,99	1
2	9	2,01	1,32	298	9	70,0	71,44	1
9	10	1,68	1,13	298	10	44,1	44,99	2
2	6	2,55	1,72	298	6	140,0	142,82	3
6	7	1,08	0,73	298	7	140,0	142,82	1
6	8	1,25	0,84	298	8	70,0	71,44	1
3	11	1,79	1,21	298	11	140,0	142,82	2
11	12	2,45	1,65	298	12	70,0	71,44	3
12	13	2,01	1,36	298	13	44,1	44,99	1
4	14	2,23	1,50	298	14	70,0	71,44	2
4	15	1,97	0,80	240	15	140,0	142,82	3
10	14	1,90	1,12	298	–	–	–	–
13	15	2,18	2,12	265	–	–	–	–
7	11	2,98	1,54	263	–	–	–	–

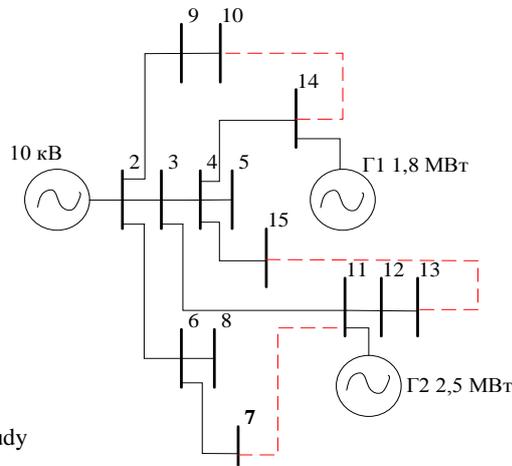


Рис. 1. Topология исследуемой сети  
 Fig. 1. Topology of the network under study

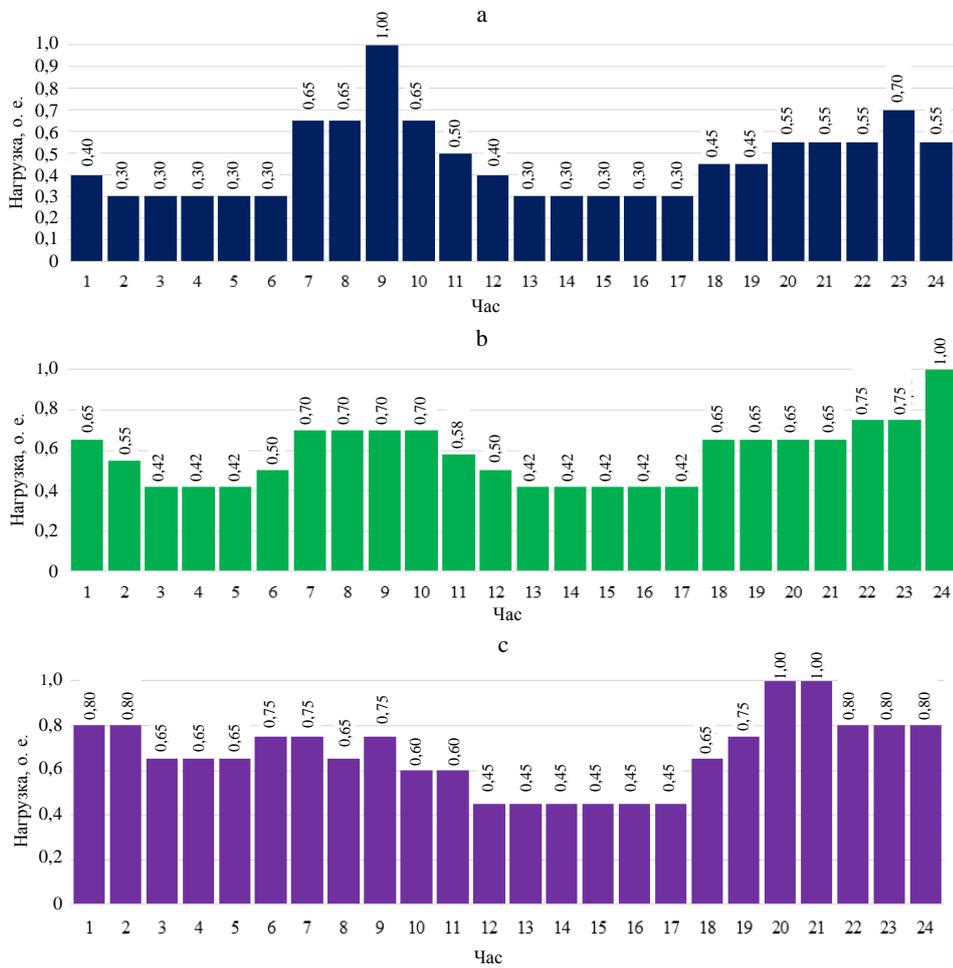


Рис. 2. График электрических нагрузок потребителя:  
 а – первого типа; б – второго; с – третьего типа

Fig. 2. Load curves of the consumer:  
 a – of the first type; b – of the second; c – of the third type

### Разработка оптимизационного алгоритма

В последние годы в прикладной математике, как и в технических системах, наметилась тенденция применения биоинспирированных подходов [14]. Одно из ведущих направлений – моделирование естественных эволюционных процессов для эффективного решения оптимизационных задач науки и техники. Речь идет о так называемых генетических алгоритмах, которые в своей терминологии многое заимствуют из естественной генетики.

Основные отличия ГА от других оптимизационных и поисковых процедур [15]:

- работают в основном не с параметрами задачи, а с закодированным множеством параметров;
- осуществляют поиск не путем улучшения одного решения, а с помощью сразу нескольких альтернатив на заданном множестве;
- для оценки качества принятия решений используют целевую функцию, а не ее различные приращения;
- применяют не детерминированные, а вероятностные правила анализа оптимизационных задач.

Положительные свойства ГА позволяют рассматривать их применение как одну из возможных альтернатив для решения данного класса оптимизационных задач. На рис. 3 представлена разработанная авторами обобщенная блок-схема реализации алгоритма генетического поиска оптимальных решений по оптимизации топологии сети с объектами генерации на базе ВИЭ с использованием многокритериальной функции приспособленности. Рассмотрим пошагово работу представленного ГА.

**Подготовка математической модели электроэнергетической системы.** В качестве исходных взяты данные о количестве узлов, линиях, генераторах, нагрузках и т. д. Из Excel-файла с исходными данными, который читается при помощи алгоритма, создается модель сети в библиотеке Pandapower. Через эту же библиотеку производится расчет оптимального потокораспределения в заданной энергосистеме на случай, если в ЭЭС будут и ВИЭ, и традиционные источники, т. е. определяется наиболее экономичный режим по загрузке генераторов. Цель расчета – найти суммарные потери мощности для конкретной топологии сети на заданный час суток. Потокораспределение определяется по методу Ньютона – Рафсона, так как он мало чувствителен к мелким погрешностям, допускаемым в процессе вычислений. Идея метода заключается в линеаризации, что позволяет свести исходную задачу решения системы нелинейных уравнений к многократному решению системы линейных уравнений. В алгоритме введено важное ограничение: если при заданной топологии сети режим не существует, вместо величины потерь топологии присваивается значение функции 1000 (вводится большой штраф, чтобы исключить заведомо плохие варианты).

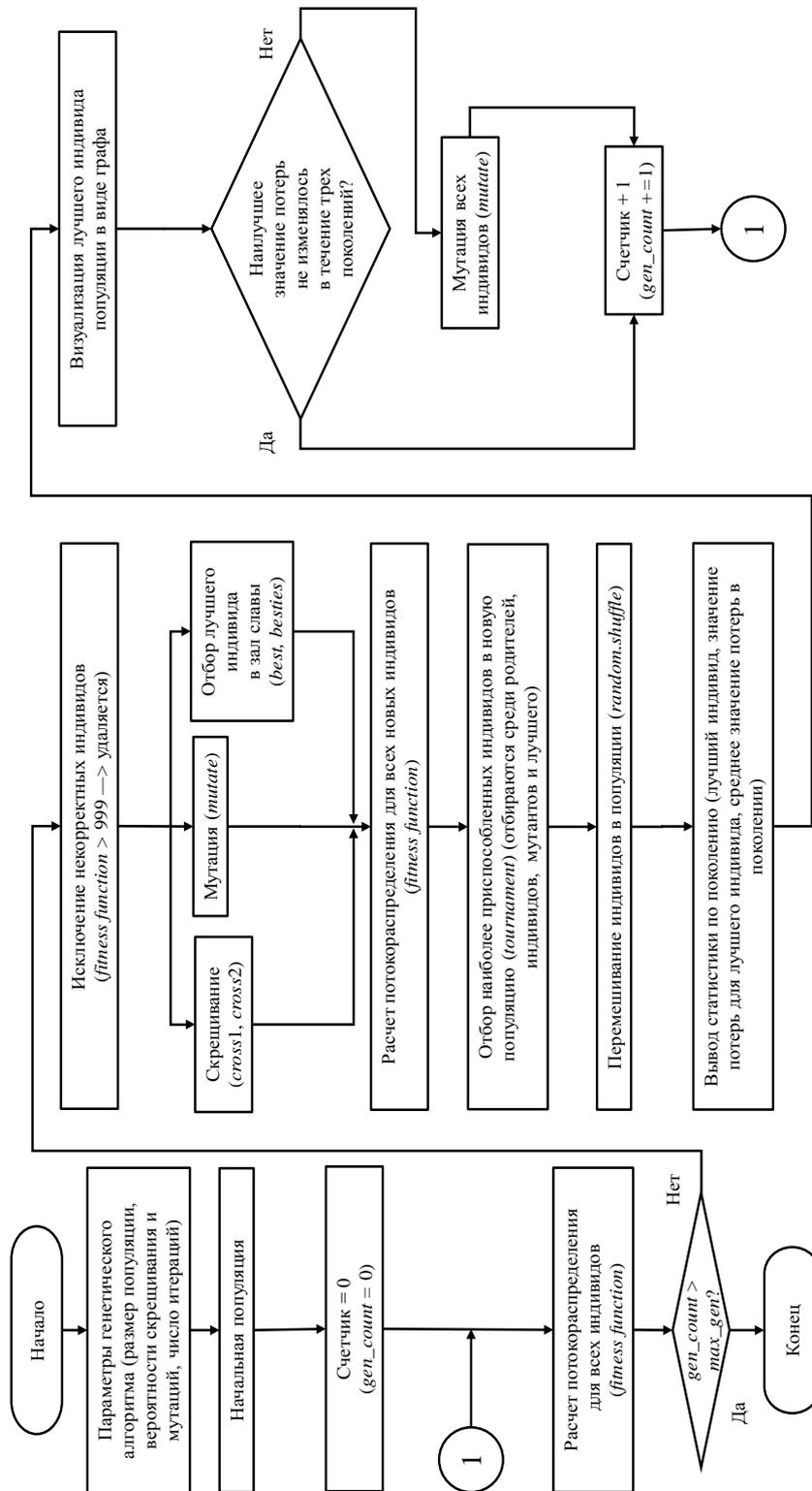


Рис. 3. Блок-схема генетического алгоритма

Fig. 3. Genetic algorithm block diagram

**Формирование индивидов. Начальная популяция.** В качестве индивидов используются зашифрованные двоичным кодом топологии ЭЭС. Индивид представляется в виде хромосомы – списка из  $N$  значений, где  $N$  – число всех ЛЭП в ЭЭС. Значения в списке могут быть только 1 или 0: 1 – ЛЭП включена, 0 – отключена. Таким образом, каждый индивид имеет набор из единиц и нулей длиной  $N$  и однозначно характеризует топологию сети. Пример представления индивида для сети с 17 ЛЭП в виде: двоичного кода [1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0] и графа (рис. 4) (вершины – узлы ЭЭС, ребра – включенные ЛЭП).

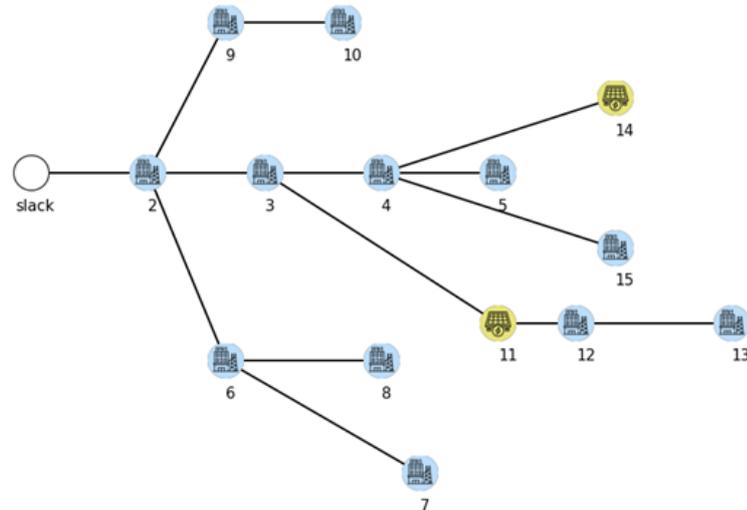


Рис. 4. Граф исходной электроэнергетической системы

Fig. 4. Original electric power system graph

Индивиды в начальной популяции формируются (функция *tree\_creation*) при помощи поиска (обхода графа сети со всеми включенными ЛЭП) в ширину и глубину, начиная из каждой вершины (узла сети). При заданных параметрах глубины и ширины алгоритм поиска соединяет все вершины графа, при этом не образуя кольцевых структур, начиная из заданной вершины. Операция повторяется с началом в каждой возможной вершине. Если получившаяся структура соединяет все вершины, не имеет циклов (т. е. является радиальной) и до этого еще не была найдена, то структура добавляется в начальную популяцию.

**Описание генетического алгоритма для поиска оптимальной топологии.** Задаются параметры ГА: размер популяции, вероятность скрещиваний и мутаций, максимальное число итераций (популяций). Размер популяции выбирается равным начальной популяции, если она небольшая (меньше 50 индивидов), в ином случае задается другое число исходя из времени реализации алгоритма.

**Функции скрещивания.** В алгоритме применяются функции скрещивания *cross1* и *cross2*, которые происходят с равной вероятностью 0,45.

*Cross1* – обычное одноточечное скрещивание (рис. 5). С заданной вероятностью из популяции выбираются два случайных родителя, определяется случайная точка деления их хромосом. Совокупность левой части первого родителя и правой части второго определяет хромосому первого потомка, совокупность правой части первого родителя и левой части второго – хромосому второго потомка. Оба потомка проверяются на соответствие их топологии радиальной структуре (*tree\_test*). Если потомок представляет собой радиальную структуру (остовный граф сети) и еще не был найден, то он добавляется в список потомства.

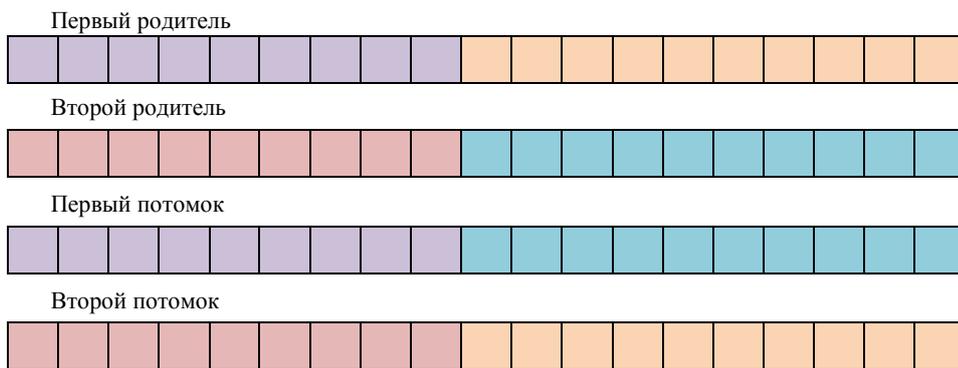


Рис. 5. Визуальная интерпретация метода *cross1*

Fig. 5. *Cross1* method visual interpretation

*Cross2* – обычное двухточечное скрещивание (рис. 6). С заданной вероятностью из популяции выбираются два случайных родителя, определяются две случайные точки деления их хромосом. Родительские хромосомы «перекручиваются» в этих точках, и получается два потомка. Оба потомка проверяются на соответствие их топологии радиальной структуре (*tree\_test*). Если потомок представляет собой радиальную структуру (остовный граф сети) и еще не был найден, то он добавляется в список потомства.

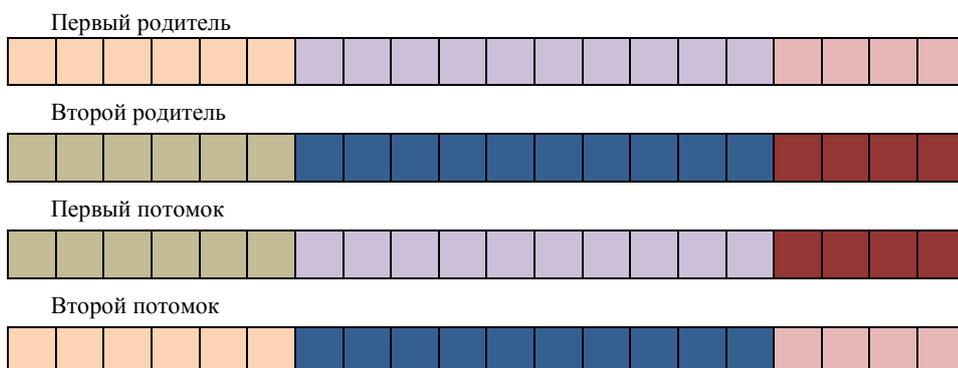


Рис. 6. Визуальная интерпретация метода *cross2*

Fig. 6. *Cross2* method visual interpretation

*Функция мутации.* С заданной вероятностью выбирается один индивид, у которого инвертируется один бит (ген), т. е. одна из ЛЭП включается (отключается). Так как индивид – радиальная структура (дерево), при мутации возможны два варианта: либо появляется цикл (кольцо/петля), либо теряется связь с узлом системы. При появлении кольца выбирается ЛЭП с наибольшим сопротивлением и отключается. При потере связи включается ЛЭП с наименьшим сопротивлением, чтобы обеспечить связность всех узлов сети.

*Функция отбора.* Отбор производится по типу честного турнира. Из индивидов выбираются  $k$  штук ( $k$  – размер турнира, задается пользователем), которые сравниваются между собой по величине суммарных потерь в сети. Далее проходит тот, у кого потери ниже. Те индивиды, которые уже участвовали в турнире, не могут участвовать повторно. Процедура повторяется до тех пор, пока не отберется нужное число индивидов для новой популяции.

*Функция отбора лучших индивидов.* В начале каждой итерации (на каждом поколении) до скрещивания определяется самый приспособленный индивид с наименьшим значением потерь. Он заносится в список лучших – зал славы, позволяющий видеть, как изменялись наиболее приспособленные индивиды.

*Функция массовой мутации (перерождения, апокалипсиса).* Если лучший индивид не сменился в течение трех поколений (значение функции приспособленности не изменялось три итерации подряд), функция мутации применяется ко всем без исключения индивидам популяции. Таким образом минимизируется возможность зависаний в точках локального оптимума.

В конце каждой итерации алгоритма выводится статистика по типу:

- лучшая приспособленность (минимальные потери) в популяции;
- средняя приспособленность;
- лучший индивид – топология с наименьшими потерями в форме двоичного кода;
- зал славы – список лучших индивидов на протяжении всех итераций.

Перед началом новой итерации алгоритма все индивиды в популяции перемешиваются (меняются местами в случайном порядке), чтобы повысить разнообразие при скрещивании. По окончании работы ГА выводятся статистические зависимости, характеризующие его работу.

### **Оценка работы алгоритма**

Корректность работы алгоритма протестирована по описанной выше схеме. Проведено восемь итераций с вероятностями скрещивания 0,95 и мутации 0,20. В результате получены кривые изменения максимальной и средней приспособленности в соответствии с продолжительностью работы алгоритма (число итераций). В качестве примера на рис. 7 приведены зависимости для состояния системы на момент времени 12:00. По их характеру можно судить о том, что алгоритм работает корректно, суммарное

значение потерь в сети снижается как для наилучшего индивида, так и в среднем в поколении с увеличением числа итераций.

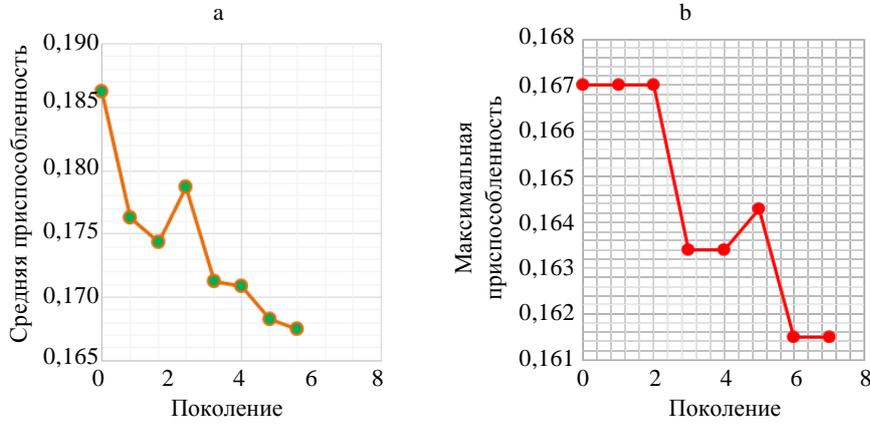


Рис. 7. Изменение приспособленности индивидов (схема 15 узлов):  
а – средней; б – максимальной

Fig. 7. Changes in individual adaptability (15 nodes scheme): a – mean; b – maximum

В целях проверки универсальности алгоритм проверен на 14-узловой тестовой схеме IEEE, дополненной генерацией на основе ВИЭ (три ветровые и две фотоэлектрические станции). Схема сети представлена на рис. 8.

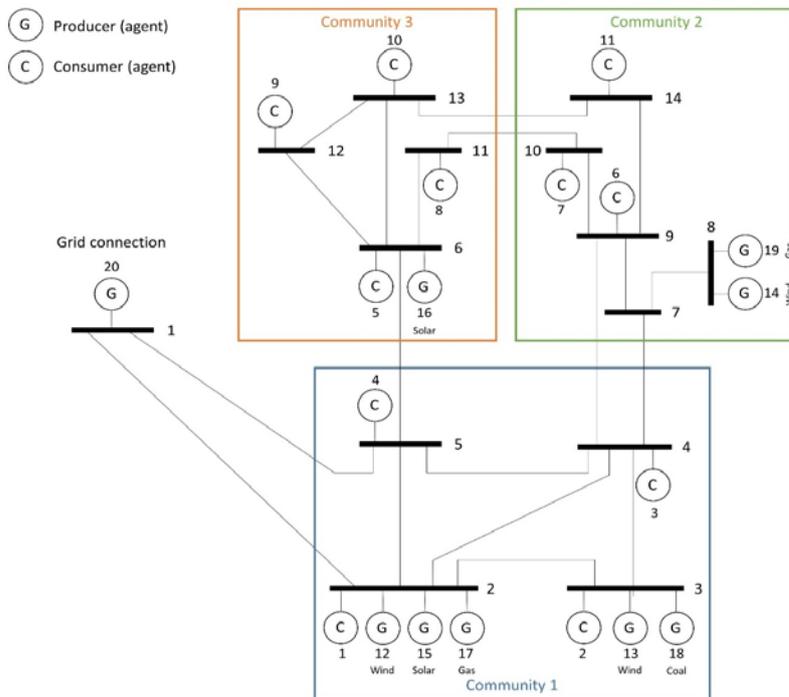


Рис. 8. Дополненная схема IEEE (14 узлов)

Fig. 8. Supplemented IEEE scheme (14 nodes)

В качестве демонстрации работы алгоритма в указанной схеме на рис. 9 представлены графики изменения средней и максимальной приспособленности индивидов за 25 итераций для состояния системы на момент времени 24:00.

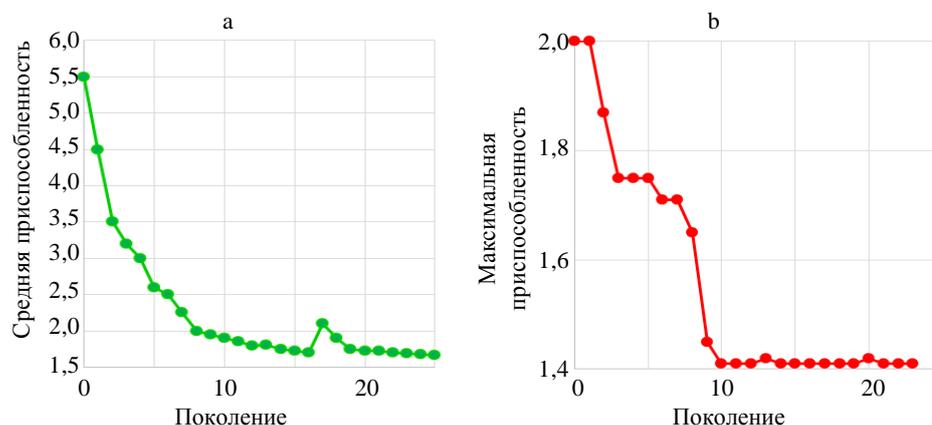


Рис. 9. Изменение приспособленности индивидов (схема 14 узлов):  
а – средней; б – максимальной

Fig. 9. Changes in individual adaptability: a – mean; b – maximum

На четвертой итерации расчета алгоритм попал в точку локального оптимума (1,742 МВт), однако через три итерации при помощи функции массовой мутации зависание алгоритма в данной точке было исключено. Оптимальное решение, найденное за 10 итераций (1,407 МВт), соответствует снижению суммарных потерь активной мощности в сети на 27,4 % по отношению к стартовой точке алгоритма (1,938 МВт). После 10-й итерации оптимальное значение не улучшалось.

Согласно данным, полученным методом полного перебора возможных радиальных конфигураций системы (1048576 конфигураций), оптимальная топология сети соответствует значению суммарных потерь активной мощности 1,308 МВт. Таким образом, результат, полученный при помощи алгоритма, отличается от истинного оптимального решения на 7,6 %. Однако время нахождения решения алгоритмом значительно меньше, чем поиск полным перебором, даже для схемы в 14 узлов.

## ВЫВОДЫ

1. Рассмотрена задача оптимизации топологии (конфигурации) распределительной сети по критерию минимизации потерь активной мощности. Для ее решения предложен модифицированный генетический алгоритм, отличительными особенностями которого являются: представление структуры распределительной сети в виде двоичного кода; создание функций скрещивания и мутации для формирования индивидов, которые имеют смысл для данной задачи; введение штрафа для тех индивидов (конфигураций), для которых отклонения параметров установившегося режима превышают предельно допустимые показатели.

2. Разработанный генетический алгоритм обладает быстрой сходимостью (порядка 10 итераций для схемы из 14 узлов), высокой точностью (найденное решение отличается от глобального оптимума на 7,6 %) и корректно работает при различных схемах сетей, структурах генерации и нагрузки. Кроме того, он позволяет определить оптимальную топологию сети, уровень суммарных потерь в которой на 27 % ниже, чем в исходной топологии.

3. Алгоритм может применяться совместно с системами прогнозирования ВИЭ-генерации на сутки вперед при планировании режимов работы энергообъединений с целью минимизации издержек на покрытие потерь электроэнергии и улучшения качества отпускаемой электроэнергии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Zhu, Y. An Improved Genetic Algorithm for Power Grid / Y. Zhu, X. Guo, J. Li // 2009 Fifth International Conference on Information Assurance and Security. Ottawa, 2009. P. 455–458. <https://doi.org/10.1109/IAS.2009.86>.
2. Dongmei, Z. Reactive Power Optimization by Genetic Algorithm Integrated with Reduced Gradient Method / Z. Dongmei, W. Pei, Z. Xu // 2014 IEEE Workshop on Advanced Research and Technology in Industry Applications (WARTIA). 2014. P. 838–841. <https://doi.org/10.1109/WARTIA.2014.6976403>.
3. Zhang, J. Reactive Power Optimization of Distribution Network Based on an Improved Genetic Algorithm / J. Zhang, T. Huang, H. Zhang // 2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific. Dalian, 2005. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/TDC.2005.1546960>.
4. Bramm, A. Optimal Reconfiguration of Distribution Network with Solar Power Plants / A. Bramm, S. Eroshenko // 2021 Ural-Siberian Smart Energy Conference (USSEC). Novosibirsk, 2021. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/USSEC53120.2021.9655718>.
5. Фурсанов, М. И. Совершенствование методики расчета установившихся режимов городских электрических сетей с учетом потребительских энергоисточников / М. И. Фурсанов, А. А. Золотой // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 6. С. 514–527. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-514-527>.
6. Smart Grids [Electronic Resource] // IEA. Mode of access: <https://www.iea.org/reports/smart-grids>. Date of access: 01.03.2021.
7. Renewable Capacity Statistics 2020 [Electronic Resource] / International Renewable Energy Agency (IRENA). 2021. Mode of access: [https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Mar/IRENA\\_RE\\_Capacity\\_Statistics\\_2020.pdf](https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2020.pdf). Date of access: 01.03.2021.
8. Strategic Planning of Renewable Energy Sources Implementation Following the Country-Wide Goals of Energy Sector Development / A. Khalyasmaa [et al.] // 2020 International Conference on Smart Technologies in Computing, Electrical and Electronics (ICSTCEE). 2020. P. 433–438. <https://doi.org/10.1109/ICSTCEE49637.2020.9277484>.
9. Microgrid Development for Remote Residential Customers Power Supply / A. Khalyasmaa [et al.] // 2020 International Conference on Smart Technologies in Computing, Electrical and Electronics (ICSTCEE). 2020. P. 186–190. <https://doi.org/10.1109/ICSTCEE49637.2020.9276813>.
10. Aburiyana, G. An Overview of Forecasting Techniques for Load, Wind and Solar Powers / G. Aburiyana, M. E. El-Hawary // 2017 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC). 2017. P. 1–7. <https://doi.org/10.1109/EPEC.2017.8286192>.
11. Jurj, D. I. Overview of Electrical Energy Forecasting Methods and Models in Renewable Energy / D. I. Jurj, D. D. Micu, A. Muresan // 2018 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE), Iasi, 18–19 October 2018. P. 87–90. <https://doi.org/10.1109/ICEPE.2018.8559807>.
12. Solar Power Prediction Based on Satellite Images and Support Vector Machine / H. S. Jang [et al.] // IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2016. Vol. 7, Iss. 3. P. 1255–1263. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2016.2535466>.
13. Фурсанов, М. И. Об управлении режимами городских электрических сетей в условиях SMART GRID / М. И. Фурсанов, А. А. Золотой // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 1. С. 15–27. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-15-27>.
14. Bioinspired Optimization Methods and Their Applications: 9<sup>th</sup> International Conference, BIOMA 2020, Brussels, November 19–20, 2020. Proceedings / under ed. B. Filipič [et al.].

Springer Nature Switzerland, 2020. 322 p. (Lecture Notes in Computer Science, vol. 12438). <https://doi.org/10.1007/978-3-030-63710-1>.

15. Immanuel, S. D. Genetic Algorithm: An Approach on Optimization / S. D. Immanuel, U. K. Chakraborty // 2019 International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES). 2019. P. 701–708. <https://doi.org/10.1109/ICCES45898.2019.9002372>.

Поступила 05.04.2022 Подписана в печать 16.06.2022 Опубликована онлайн 29.07.2022

#### REFERENCES

- Zhu Y., Guo X., Li J. (2009) An Improved Genetic Algorithm for Power Grid. *2009 Fifth International Conference on Information Assurance and Security*. Ottawa. 455–458. <https://doi.org/10.1109/IAS.2009.86>.
- Dongmei Z., Pei W., Xu Z. (2014) Reactive Power Optimization by Genetic Algorithm Integrated with Reduced Gradient Method. *2014 IEEE Workshop on Advanced Research and Technology in Industry Applications (WARTIA)*, 838–841. <https://doi.org/10.1109/WARTIA.2014.6976403>.
- Zhang J., Huang T., Zhang H. (2005) The Reactive Power Optimization of Distribution Network Based on an Improved Genetic Algorithm. *2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific*. Dalian, 1–4. <https://doi.org/10.1109/TDC.2005.1546960>.
- Bramm A., Eroshenko S. (2021) Optimal Reconfiguration of Distribution Network with Solar Power Plants. *2021 Ural-Siberian Smart Energy Conference (USSEC)*. Novosibirsk, 1–5. <https://doi.org/10.1109/USSEC53120.2021.9655718>.
- Fursanov M. I., Zalotoy A. A. (2019) Improvement of the Method of Calculation of Steady-State Modes of Urban Electric Networks Taking into Account Consumer Energy Sources. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (6), 514–527. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-514-527> (in Russian).
- Smart Grids. IEA. Available at: <https://www.iea.org/reports/smart-grids> (Accessed 1 March 2021).
- International Renewable Energy Agency IRENA (2020). *Renewable Capacity Statistics 2020*. Available at: [https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Mar/IRENA\\_RE\\_Capacity\\_Statistics\\_2020.pdf](https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2020.pdf).
- Khalyasmaa A., Eroshenko S., Bramm A., Tran D. C., Chakravarthi Teja P., Hariprakash R. (2020) Strategic Planning of Renewable Energy Sources Implementation Following the Country-Wide Goals of Energy Sector Development. *2020 International Conference on Smart Technologies in Computing, Electrical and Electronics (ICSTCEE)*, 433–438. <https://doi.org/10.1109/ICSTCEE49637.2020.9277484>.
- Khalyasmaa A., Eroshenko S., Bramm A., Chakravarthi Teja P., Hariprakash R. (2020) Microgrid Development for Remote Residential Customers Power Supply. *2020 International Conference on Smart Technologies in Computing, Electrical and Electronics (ICSTCEE)*, 186–190. <https://doi.org/10.1109/ICSTCEE49637.2020.9276813>.
- Aburiyana G., El-Hawary M. E. (2017) An Overview of Forecasting Techniques for Load, Wind and Solar Powers. *2017 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/EPEC.2017.8286192>.
- Jurj D. I., Micu D. D., Muresan A. (2018) Overview of Electrical Energy Forecasting Methods and Models in Renewable Energy. *2018 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE)*, 87–90. <https://doi.org/10.1109/ICEPE.2018.8559807>.
- Jang H. S., Bae K. Y., Park H.-S., Sung D. K. (2016) Solar Power Prediction Based on Satellite Images and Support Vector Machine. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 7 (3), 1255–1263. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2016.2535466>.
- Fursanov M. I., Zalotoy A. A. (2018) On the Management of Urban Electric Networks in the Conditions of the SMART GRID. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (1), 15–27. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-15-27> (in Russian).
- Filipičed B. (ed.) [et al.] (2020) *Bioinspired Optimization Methods and Their Applications: 9<sup>th</sup> International Conference, BIOMA 2020, Brussels, November 19–20, 2020. Lecture Notes in Computer Science, 12438*. Springer Nature Switzerland. 322 <https://doi.org/10.1007/978-3-030-63710-1>.
- Immanuel S. D., Chakraborty U. K. (2019) Genetic Algorithm: An Approach on Optimization. *International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*, 701–708. <https://doi.org/10.1109/ICCES45898.2019.9002372>.

Received: 5 April 2022

Accepted: 16 June 2022

Published online: 29 July 2022