
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.316.1

EDN CCONYN

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ РЕАЛИЗАЦИИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 6-35 кВ

В.Ю. ВуколовORCID: 0000-0001-6378-4373 e-mail: Vvucolov@mail.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***И.В. Жаринов**ORCID: 0009-0003-4544-8458 e-mail: i_zharinov@mail.ruДзержинский политехнический институт (филиал)
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Дзержинск, Россия

Представлены результаты разработки проблемы многокритериального выбора при оптимизации электросетей 6-35 кВ. При проектировании электрической сети выбор оптимальной конфигурации является ответственным этапом, играющим важнейшую роль в формировании экономических и технических показателей энергосистемы. Главной целью при этом является использование интеллектуальных электронных устройств, снижение потерь при передаче электроэнергии, обеспечение требуемого уровня надежности сети, а также разработка схемы быстродействующих переключения в аварийных режимах, которая предусматривает отключения узлов энергосистемы при переходе между режимами и в критических ситуациях. В процессе реконфигурации для повышения производительности системы происходит изменение функциональных связей между элементами распределительной электросети. Высокая степень влияния неопределенностей на стабильность работы и надежность электросетей обуславливает необходимость разработки методов их преодоления, одним из эффективных является метод, основанный на оптимизации по Парето.

Представлены методы определения оптимальной разомкнутой конфигурации электросетевого района, основанные на принципе Парето. Они могут быть реализованы индивидуально для каждого потребителя исследуемой распределительной сети. Разработанные алгоритмы сравнения альтернативных вариантов и поиска оп-

тимального решения реализуются с применением единичных показателей надежности, отражающих различные аспекты целевого назначения системы с учетом особенностей их функционирования. В рамках проведенного исследования в качестве мажоритарного критерия использовался критерий максимальной надежности. Также учитывался приоритет мощности при определении ключевого потребителя. Применение критерия оптимальности по Парето дает набор «неидеальных» решений, каждое из которых превосходит остальные хотя бы по одному признаку. Практическая реализация разработанных алгоритмов в автоматизированных системах управления режимом и конфигурацией распределительных электрических сетей позволит повысить эффективность передачи электроэнергии, что приведет к снижению расхода первичного топлива (газ, уголь, мазут и т.п.) на производство электроэнергии, а также величины возможного ущерба от нарушения электроснабжения потребителей.

Ключевые слова: время бесперебойной работы, категория надежности, конфигурация сети, критерий, надежность, недоотпуск энергии, отказ, параметр потока восстановления, потери электроэнергии, принцип надежности Парето, распределительная сеть.

Для цитирования: Вуколов В.Ю., Жаринов И.В. Разработка алгоритмов реализации многокритериального определения оптимальной конфигурации распределительных электрических сетей 6-35 кВ // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 3. С. 4-21. EDN CCOHYN

DEVELOPMENT OF ALGORITHMS FOR IMPLEMENTATION OF MULTICRITERIAL DETERMINATION OF THE OPTIMAL CONFIGURATION OF 6-35 kV DISTRIBUTION ELECTRIC NETWORKS

V.Yu. Vukolov

ORCID: 0000-0001-6378-4373 e-mail: Vvucolov@mail.ru
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

I.V. Zharinov

ORCID: 0009-0003-4544-8458 e-mail: i_zharinov@mail.ru
Dzerzhinsky Polytechnic Institute (branch)
«Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev»
Dzerzhinsk, Russia

Abstract. The article presents the results of developing a multi-criteria choice problem for optimizing 6-35 kV power networks. Selecting the optimal network configuration is a critical stage in the design of an electrical network that plays a key role in shaping the economic and technical performance of the power system. The main goal is to use intelligent electronic devices, reduce losses during power transmission, ensure the required

level of network reliability, and develop a high-speed switching scheme in emergency modes that provides the disconnection of power system nodes during transition between modes and in critical situations. Functional relationships between elements of the distribution network are changed during the reconfiguration process to improve system performance. The high degree of influence of uncertainties on the stability of operation and reliability of power networks necessitates the development of methods to overcome them. One of the effective methods is the method based on Pareto optimization.

The paper presents methods for determining the optimal open configuration of an electric network that implement the Pareto principle. These methods can be implemented individually for each consumer of the distribution network under study. The developed algorithms for comparing alternative options and searching for the optimal solution are implemented using single reliability indicators that reflect various aspects of the intended purpose of the system, taking into account the operating features. The maximum reliability criterion was used as a majority criterion. The priority of power was also taken into account when determining the key consumer. The use of the Pareto optimality criterion yields a set of «less than ideal» solutions, each of which is superior to the others in at least one way. The practical implementation of the developed algorithms in automated control systems for the mode and configuration of distribution electric networks will increase the efficiency of electricity transmission, which will lead to a reduction in the consumption of primary fuel (gas, coal, fuel oil, etc.) for electricity production, and will also reduce the amount of possible damage from a power supply disruption to consumers.

Keywords: uptime, reliability category, network configuration, criterion, reliability, undersupply of energy, failure, recovery flow parameter, power losses, Pareto reliability principle, uptime, distribution network.

For citation: V.Yu. Vukolov and I.V. Zharinov, “Development of algorithms for implementation of multicriterial determination of the optimal configuration of 6-35 kV distribution electric networks”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 4-21, 2025. EDN CCOHYN

I. Введение

Обеспечение надежного и бесперебойного снабжения потребителей электроэнергией надлежащего качества является главной задачей электроэнергетических систем. Конечным звеном передачи электроэнергии до трансформаторных подстанций являются распределительные электрические сети 6-35 кВ, самые протяженные и разветвленные (протяженность сетей 6-35 кВ в России составляет порядка 2 млн км). Одним из главных показателей систем электроснабжения является их надежность, на которую значительное влияние оказывают случайные события, происходящие в условиях реальной эксплуатации: отказы, аварии в энергосистемах, нестабильность генерации и т.п.

В современных условиях электроэнергетический комплекс характеризуется высокой степенью изношенности основных фондов. Так, по дан-

ным Министерства энергетики РФ [1], суммарная мощность генерирующего оборудования, введенного в эксплуатацию в 1961-1970 гг., составляет 42,3 тыс. МВт (17,1 %), в 1971-1980 гг. – 55,6 тыс. МВт (22,5 %) и в 1981-1990 гг. – 51,4 тыс. МВт (20,8 %). Суммарная установленная мощность генерирующего оборудования, введенного в эксплуатацию до 1961 г., составляет 14,0 тыс. МВт (5,7 %), введенного в эксплуатацию в 1991-2022 гг. – 84,3 тыс. МВт (34 %). Более 50 % оборудования работает с превышением нормативного срока эксплуатации, что приводит к снижению надежности электроснабжения конечных потребителей, отказам и убыткам [2, 3]. Текущее состояние электросетевого комплекса также характеризуется снижением инвестиций в обновление основного оборудования. Программы перспективного развития электрических сетей тоже существенно сокращены. Возникает необходимость разработки как однокритериальных, так и многокритериальных подходов, которые позволят без дополнительных капитальных затрат обеспечить повышение эффективности функционирования распределительных электрических сетей напряжением 6-35 кВ. Поставленная задача достигается управлением конфигурацией сети на основе величины нагрузочных потерь мощности и показателей надежности включенных в работу элементов электропередачи в нормальном, ремонтном и послеаварийном режимах.

Вопросам повышения надежности и эффективности передачи электрической энергии в распределительных сетях 6-35 кВ посвящено большое количество работ как отечественных [4-8], так и зарубежных авторов [9-16]. В то же время при решении задачи обеспечения эффективности субъектов электроэнергетики до сих пор актуальными остаются вопросы оптимизации конфигурации и режимов электрических сетей.

При разработке алгоритмов управления конфигурацией распределительных электрических сетей требуется учитывать следующие факторы:

- соответствие напряжения в узлах подключения потребителей нормативным требованиям;
- соответствие допустимых токовых нагрузок линий электропередачи (ЛЭП) их характеристикам;
- нагрузочные потери электроэнергии в нормальном установившемся режиме сети;
- показатели надежности элементов электропередачи.

II. Применение принципа Парето при управлении конфигурацией сети

В условиях реальной эксплуатации распределительные сети 6-35 кВ либо радиальные, либо длительно работают в разомкнутом режиме [17]. Таким образом, каждый потребитель получает питание одновременно только от одного источника. Управление нормальным режимом такой сети сводится к выбору предпочтительной разомкнутой конфигурации с учетом

схемных и режимных ограничений. Решение поставленной задачи тем сложнее, чем больше элементов в электрической сети [18].

В большинстве практических задач оптимальную конфигурацию распределительной сети 6-35 кВ определяют по одному критерию (т.н. «однокритериальная оптимизация»). Данный метод прост и быстр в реализации. С другой стороны, однокритериальный подход не дает возможности эффективно учитывать множество требований со стороны различных субъектов рынка электрической энергии, которые зачастую являются противоречивыми. При решении задач управления системой электроснабжения в условиях необходимости учета интересов всех участников процесса передачи и распределения электроэнергии, которые характеризуются наличием множества критериев оптимизации, целесообразно применять многокритериальные алгоритмы, способные учитывать весь спектр характеристик системы электропередачи (т.н. «оптимизация по Парето»).

Применение критерия оптимальности по Парето дает набор «неидеальных» решений, каждое из которых превосходит остальные хотя бы по одному признаку. Количество Парето-оптимальных вариантов, как правило, достаточно велико, поэтому требуется дальнейший анализ решений с целью определения одного или нескольких наилучших вариантов [19]. Таким образом, данную теорию целесообразно использовать лишь в том случае, когда имеется явный приоритет между выбранными критериями оптимизации.

Множество Парето представляет собой множество неулучшаемых вариантов решений, т.е. вариант является Парето-оптимальным, если значение любого критерия можно улучшить, лишь ухудшая значения остальных. Это можно представить следующим выражением (1) [20]:

$$x_i^k \geq x_l^k, \quad k = \overline{1, K}, \quad l = \overline{1, I}, \quad (1)$$

где x_i^k — значение критерия k альтернативы i ; x_l^k — значение критерия k альтернативы l ; K — множество критериев типа «выигрыш»; I — все множество сравниваемых альтернатив.

Согласно представленному подходу, для каждой точки передачи электрической энергии (узла нагрузки) определяется разомкнутая Парето-оптимальная конфигурация распределительной сети 6-35 кВ. Для окончательного определения оптимального решения используют другие методы многопараметрической оптимизации (метод последовательных уступок [21], метод главного критерия [22] и др.), т.е. применяется комбинированный подход при оптимизации сложных систем.

III. Реализация комбинированного подхода при определении оптимальной конфигурации распределительной сети 6-35 кВ

В качестве модели для апробации разрабатываемых алгоритмов выбран уже рассмотренный ранее [2] участок электрических сетей Нижегородской области номинальным напряжением 35 кВ (рис. 1). На основе однолинейной схемы строится ненаправленный граф электросетевого района. Центрами питания (ЦП) рассматриваемого участка сети являются распределительные устройства 35 кВ Новогорьковской ТЭЦ (НГ ТЭЦ) и ПС Рубин.

В качестве исходных данных для расчета параметров режима сети и определения нагрузочных потерь мощности использована следующая информация:

- марка и сечение проводов ЛЭП;
- расположение проводов на опорах ЛЭП;
- удельное активное сопротивление проводов;
- паспортные характеристики силовых трансформаторов;
- активная и реактивная мощности нагрузок на стороне низкого напряжения силовых трансформаторов (узлы 11-19).

Путем применения алгоритма построения всех деревьев графа сетевого района (позволяет автоматизировать процесс получения разомкнутых конфигураций) получено четырнадцать возможных конфигураций сети [2], обеспечивающих питание всех нагрузочных узлов (табл. 1).

Анализ полученных результатов показывает, что установленным ранее требованиям соответствуют только первые двенадцать конфигураций рассматриваемой сети 35 кВ, причем длительное использование в нормальном установившемся режиме конфигураций №7 и 8 также может быть ограничено ввиду повышенной токовой нагрузки.

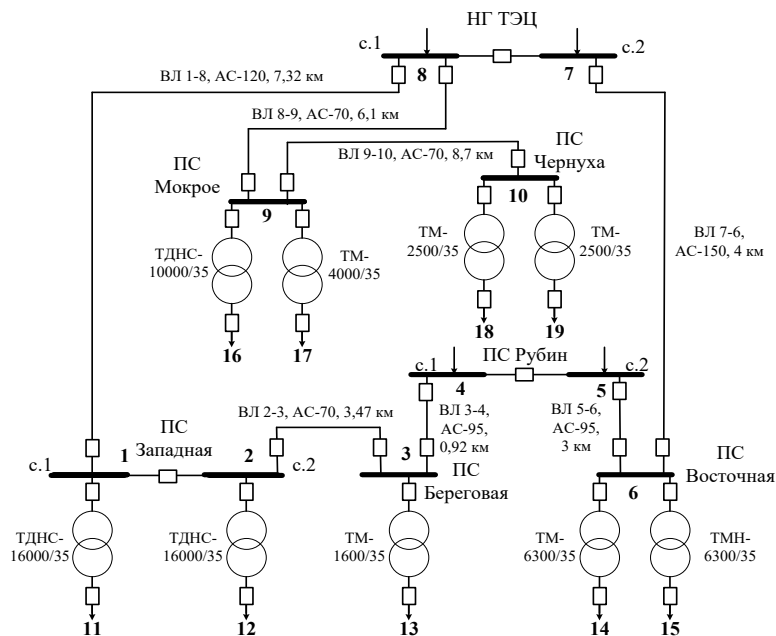
Для анализа полученных конфигураций сети по критерию надежности приняты следующие показатели [2]:

- время бесперебойной работы ($t_{бр}$, год);
- параметр потока восстановлений ($\omega_{в}$ 1/год);
- интенсивность восстановления ($\mu = 1/t_{в}$, 1/ч).

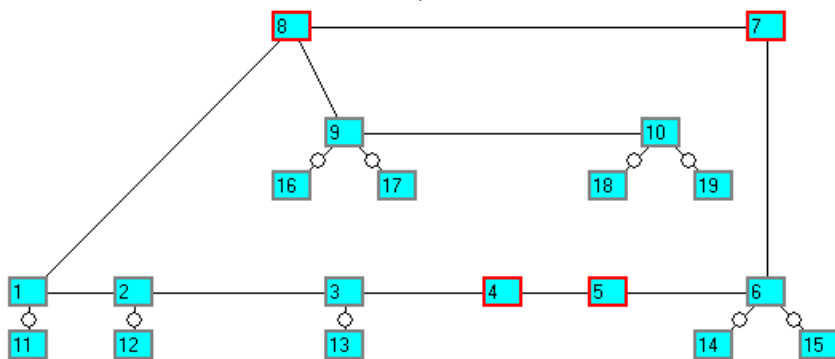
Блок-схема алгоритма приведена на рис. 2.

Для представленной на рис. 1 распределительной электрической сети суммарно существует 68 разомкнутых путей питания конечных потребителей (узлы 11-19) от источников (узлы 4, 5, 7, 8). Результаты выбора Парето-оптимальных конфигураций представлены в табл. 2.

Полученные результаты показывают, что критерию Парето-оптимальности соответствуют 24 пути питания из 68. В то же время каждое из представленных решений по отдельности не позволяет получить оптимальную разомкнутую конфигурацию участка электрических сетей в целом.



а)



б)

Рис. 1. Однолинейная схема (а) и граф (б) модельного участка электрических сетей напряжением 35 кВ

Fig. 1. Single-line diagram (a) and graph (b) of a model section of 35 kV electrical network

Таблица 1.
Характеристики возможных разомкнутых конфигураций сетевого района

Table 1.
Characteristics of possible open configurations of network

№ конфигурации	Отключенные ветви	Нагрузочные потери, МВт	Характеристика режима электропередачи
1	7-8, 4-5, 1-2, 5-6	0,141	Соответствует требованиям
2	7-8, 4-5, 1-2, 7-6	0,143	Соответствует требованиям
3	7-8, 4-5, 2-3, 7-6	0,181	Соответствует требованиям, сильно загружена ветвь 1-8 (0,180 кА)
4	7-8, 4-5, 2-3, 5-6	0,174	
5	7-8, 4-5, 3-4, 5-6	0,192	Соответствует требованиям, сильно загружена ветвь 1-8 (0,195 кА)
6	7-8, 4-5, 3-4, 7-6	0,193	
7	7-8, 4-5, 1-8, 5-6	0,182	Соответствует требованиям, сильно загружены ветви 3-4 (0,194 кА) и 2-3 (0,183 кА, загрузка близка предельной в режиме максимума). Не желательна длительная работа.
8	7-8, 4-5, 1-8, 7-6	0,184	
9	7-8, 1-8, потеря ЦП 4 и 5	0,320	Соответствует требованиям.
10	7-8, 4-5, потеря ЦП 4 и 5	0,194	Соответствует требованиям
11	7-8, 2-3, потеря ЦП 4 и 5	0,184	Соответствует требованиям
12	7-8, 1-2, потеря ЦП 4 и 5	0,173	Соответствует требованиям, сильно загружена ветвь 7-6 (0,139 кА)
13	7-8, 4-5, потеря ЦП 7 и 8	0,320	Не соответствует требованиям, сильно загружена ветвь 3-4 (0,299 кА) и 2-3 (0,285 кА, перегрузка в режиме максимума)
14	7-8, потеря ЦП 4, 5 и 8	0,73	Не соответствует требованиям. Напряжения снижаются ниже допустимых, перегружаются ветви 7-6, 3-2

Для решения этой задачи предлагается использовать метод последовательных уступок. Его суть – разбиение процесса поиска результирующей конфигурации на этапы, на каждом из которых осуществляется сортировка возможных решений по одному приоритетному критерию от максимального значения к минимальному с учетом возможных ограничений.

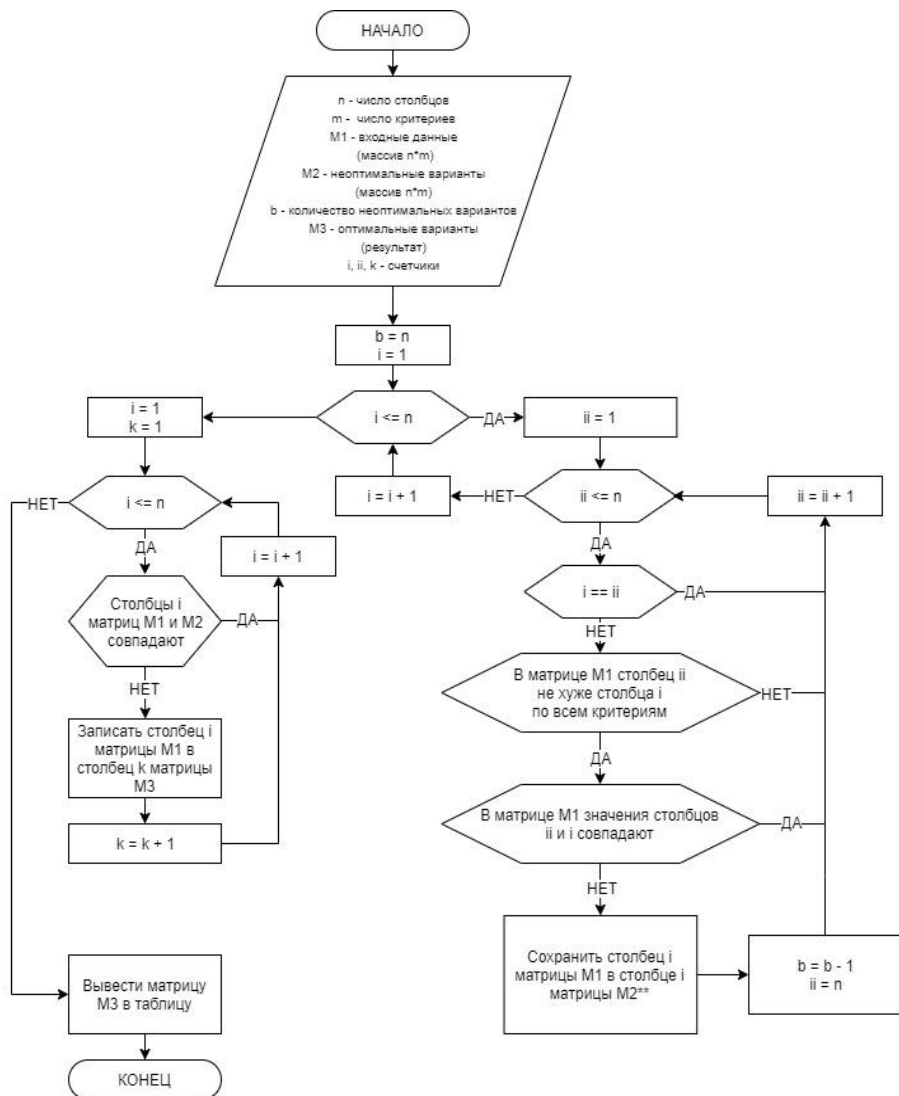


Рис. 2. Блок-схема процесса выбора
Парето-оптимальных конфигураций электрической сети

Fig. 2. Block diagram of the algorithm for selecting
Pareto-optimal configurations of the electrical network

Таблица 2.
Парето-оптимальные конфигурации сети 35 кВ

Table 2.
Pareto-optimal configurations of the 35 kV network

№ узла (нагрузка)	№ конфи- гурации	Путь по узлам от источника	т _{бр} , год	Фв, 1/год	μ, 1/ч
11	3	7-8-1-11	0,15	0,14	0,17
	6	4-5-6-7-8-1-11	0,075	0,206	0,120
12	6	4-5-6-7-8-1-2-12	0,074	0,207	0,109
13	5	4-3-13	0,363	0,012	0,164
	6	4-5-6-7-8-1-2-3-13	0,033	0,238	0,099
	7	5-4-3-13	0,342	0,013	0,184
14	8	5-4-3-2-1-8-7-6-14	0,047	0,218	0,098
15	8	5-4-3-2-1-8-7-6-15	0,047	0,218	0,098
16	1	8-9-16	0,27	0,07	0,19
	2	7-8-9-16	0,26	0,07	0,20
	3	7-6-5-4-3-2-1-8-9-16	0,06	0,24	0,09
	4	4-3-2-1-8-9-16	0,09	0,19	0,12
	6	5-4-3-2-1-8-9-16	0,088	0,192	0,136
17	1	8-9-17	0,27	0,07	0,19
	2	7-8-9-17	0,26	0,07	0,20
	3	7-6-5-4-3-2-1-8-9-17	0,06	0,24	0,09
	4	4-3-2-1-8-9-17	0,09	0,19	0,12
	6	5-4-3-2-1-8-9-17	0,088	0,192	0,136
18	2	7-8-9-10-18	0,21	0,11	0,19
	4	4-3-2-1-8-9-10-18	0,11	0,17	0,12
	6	5-4-3-2-1-8-9-10-18	0,113	0,168	0,141
19	2	7-8-9-10-19	0,21	0,11	0,19
	4	4-3-2-1-8-9-10-19	0,11	0,17	0,12
	6	5-4-3-2-1-8-9-10-19	0,113	0,168	0,141

Существенным аспектом при практической реализации метода последовательных уступок в задаче управления конфигурацией распределительных электрических сетей является учет ключевого потребителя. Оценка влияния ключевого потребителя на выбор оптимальной конфигурации рассматривается в двух сценариях.

1. Приоритет пути питания до ключевого потребителя по надежности с последующим построением разомкнутой оптимальной конфигурации для всего участка сети.

2. Построение разомкнутой конфигурации для всех нагрузочных узлов поочередно с приоритетом ключевого потребителя по мощности нагрузки.

Алгоритм определения оптимальной разомкнутой конфигурации распределительной сети 6-35 кВ методом последовательных уступок с приоритетом ключевого потребителя по надежности включает следующие этапы.

1. Критерии ранжируются по степени относительной значимости. Для рассматриваемого примера: на первом месте – время безотказной работы $t_{БР}$, на втором – интенсивность восстановления μ , на третьем – параметр потока восстановлений ω_B .

2. Определяется максимальное значение $t_{БР}$ (табл. 2) как наиболее значимого критерия (узел 13, конфигурация №5, маршрут 4-3-13, $t_{БР} = 0,363$).

3. Выбирается значение допустимой уступки (Δ), в рамках которого будет рассматриваться возможное снижение критерия (в примере $\Delta = 0,2$). Значение уступки принимается расчетчиком самостоятельно, однако возможное снижение критерия с учетом выбранной уступки не должно выходить за допустимые границы диапазона. При отсутствии ограничений величина уступки определяется, исходя из желаемого сокращения множества Парето-оптимальных решений. В то же время необходимо учесть, что занижение величины Δ может привести к излишнему сокращению рассматриваемой выборки и не оставить возможности для оптимизации на основе следующих по приоритету критериев. В результате из возможных Парето-оптимальных путей питания узлов нагрузки рассматриваемой сети 35 кВ (рис. 1) отбираются только те, у которых $t_{БР}$ находится в диапазоне от 0,163 до 0,363 (табл. 3). Множество Парето-оптимальных решений сокращается до 8 из начальных 24.

4. Определяется максимальное значение μ (табл. 3) как второго по значимости критерия (узлы 16 или 17, конфигурация № 2, маршруты 7-8-9-16 или 7-8-9-17, $\mu = 0,2$).

5. Назначается величина уступки ($\Delta = 0,015$). В результате диапазон возможных решений дополнительно сужается (табл. 3).

6. Этапы 4 и 5 повторяются для каждого из рассматриваемых критериев оптимизации.

Для рассматриваемого примера реализация алгоритма заканчивается на поиске максимального значения третьего по приоритету критерия (ω_B) с учетом величины уступки по второму (ранжируются только конфигурации, для которых значение μ находится в диапазоне от 0,185 до 0,2). При таком подходе узлы 18 и 19 конфигурации № 2 были определены как ключевые (пути питания от источника 7-8-9-10-18 и 7-8-9-10-19).

В то же время, поскольку все разомкнутые конфигурации рассматриваемого района распределительных сетей предусматривают отключение ветви 7-8 (табл. 1), полученные пути передачи электроэнергии от источника

к узлам 18 и 19 не могут быть задействованы в задаче управления конфигурацией. Таким образом, необходимо исключить из рассмотрения пути питания, включающие ветвь 7-8, а в качестве ключевых выбрать узлы 16 и 17 конфигурация №1 (путь питания 8-9-16 и 8-9-17).

Таблица 3.

Множество Парето-оптимальных решений с учетом оптимизации

Table 3.

A variety of Pareto-optimal solutions, taking into account the optimization

Узел	№ конфигурации	Путь по узлам от источника	$t_{БР}$, год	ω_B 1/год	μ , 1/ч
Оптимизация по времени бесперебойной работы					
13	5	4-3-13	0,363	0,012	0,164
13	7	5-4-3-13	0,342	0,013	0,184
16	1	8-9-16	0,27	0,07	0,19
17	1	8-9-17	0,27	0,07	0,19
16	2	7-8-9-16	0,26	0,07	0,2
17	2	7-8-9-17	0,26	0,07	0,2
18	2	7-8-9-10-18	0,21	0,11	0,19
19	2	7-8-9-10-19	0,21	0,11	0,19
Оптимизация по интенсивности восстановления					
16	2	7-8-9-16	0,26	0,07	0,2
17	2	7-8-9-17	0,26	0,07	0,2
18	2	7-8-9-10-18	0,21	0,11	0,19
19	2	7-8-9-10-19	0,21	0,11	0,19
16	1	8-9-16	0,27	0,07	0,19
17	1	8-9-17	0,27	0,07	0,19
13	7	5-4-3-13	0,342	0,013	0,184
13	5	4-3-13	0,363	0,012	0,164

Аналогичным образом осуществляется обеспечение связей до остальных потребителей. При этом может возникнуть ситуация, когда выбранные пути питания на этапе оптимизации по второму и последующим критериям не будут соответствовать ни одной из возможных разомкнутых конфигураций исходной распределительной сети. В этом случае следует вернуться на этап оптимизации по предыдущему критерию и увеличить значение допустимой уступки Δ . Тогда при расчете связей до узлов подключения нагрузки будет рассматриваться больший набор конфигураций, включая неоптимальные по Парето.

Необходимо отметить, что показатель надежности, несмотря на его важность, зачастую не позволяет учесть реальную картину потребления электроэнергии при определении оптимальной конфигурации сети. Необходимо учитывать также мощность нагрузки потребителя. В качестве ключевого потребителя целесообразно выбирать узел с максимальной мощностью

нагрузки с последующим расчетом связей до остальных нагрузочных узлов. Для рассматриваемой модели сети приоритетным будет узел 11.

Алгоритм построения разомкнутой конфигурации для всех нагрузочных узлов поочередно с приоритетом ключевого потребителя по мощности нагрузки включает те же этапы, но имеет ряд особенностей при реализации. Максимальная активная мощность нагрузки подключена к узлу 11, однако выбор оптимального пути питания узла 11 из числа Парето-оптимальных решений невозможен, поскольку каждое из них характеризуется включенным состоянием ветви 7-8. Поэтому выбор пути питания узла 11 необходимо производить из всех возможных вариантов. Приоритет показателей надежности при реализации метода последовательных уступок аналогичен представленному ранее. Процесс выбора оптимального пути питания подробно представлен в табл. 4.

Таблица 4.

Порядок выбора оптимального пути питания до узла нагрузки 11

Table 4.

The procedure for choosing the optimal power supply path to the load node 11

Узел	№ конфигурации	Путь по узлам от источника	$t_{бр}$, год	ОВ 1/год	μ , 1/ч
11	7	5-4-3-2-1-11	0,203	0,045	0,137
11	5	4-3-2-1-11	0,18	0,044	0,126
11	1	8-1-11	0,15	0,14	0,16
11	4	7-6-5-4-3-2-1-11	0,08	0,11	0,09
Величина уступки времени бесперебойной работы $\Delta = 0,1$					
11	1	8-1-11	0,15	0,14	0,16
11	7	5-4-3-2-1-11	0,203	0,045	0,137
11	5	4-3-2-1-11	0,18	0,044	0,126
Величина уступки интенсивности восстановления $\Delta = 0,03$					
11	1	8-1-11	0,15	0,14	0,16
11	7	5-4-3-2-1-11	0,203	0,045	0,137

В табл. 4 выделены пути питания, соответствующие диапазону отклонения с учетом величины уступки. Итоговый путь от источника до ключевого узла подключения нагрузки: 8-1-11. Полученный результат позволяет из двенадцати соответствующих требованиям разомкнутых конфигураций рассматриваемой распределительной сети 35 кВ (табл. 1) исключить конфигурации № 7, 8 и 9 как не соответствующие приоритетному пути до ключевого узла нагрузки. Аналогично производится выбор оптимальных путей питания от источников до других точек подключения нагрузки (узлы 12-19) в порядке уменьшения мощности потребителей. Результаты представлены на рис. 2. Цифрами от 1 до 6 обозначена последовательность выбранных путей питания.

Полученное решение соответствует конфигурации № 4 (табл. 1) с отключенными ветвями 7-8, 4-5, 2-3, 5-6, которая характеризуется близкой к предельной загрузке ветви 1-8. Если такой режим длительно недопустим, необходимо повторить процесс реализации метода последовательных уступок, но уже с меньшим числом исходных допустимых конфигураций.

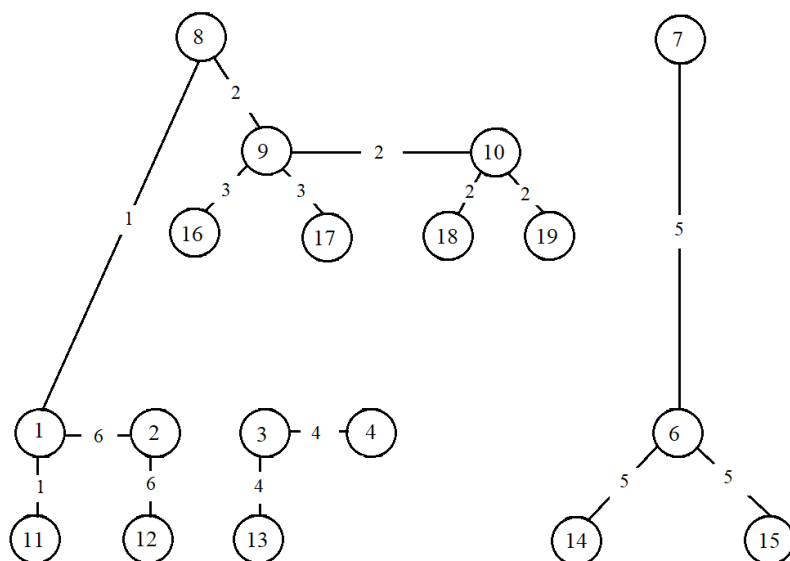


Рис. 2. Ненаправленный граф, соответствующий оптимальной разомкнутой конфигурации участка электрических сетей напряжением 35 кВ

Fig. 2 An undirected graph corresponding to the optimal open-circuit configuration of 35 kV electrical network

Результаты выбора оптимальной конфигурации сетевого района с применением стратегий приоритета ключевого потребителя по надежности/мощности нагрузки при многокритериальной оптимизации совпали. Однако нельзя говорить об их тождественности, поскольку вошедшие в итоговую разомкнутую конфигурацию пути питания узлов нагрузке сильно зависят от величин уступок, принятых на каждом этапе оптимизации. При увеличении числа узлов и ветвей рассматриваемой схемы сети, а также при иных значениях показателей надежности или уступок, результаты оптимизации могут не совпасть. Для практической реализации из двух вариантов рассмотренных вариантов алгоритма управления конфигурацией следует отдавать предпочтение вариации с приоритетом ключевого потребителя по мощности нагрузки. Поиск Парето-оптимальных путей питания узлов

нагрузки можно использовать только на первом этапе оптимизации (при выборе пути до ключевого потребителя), чтобы не ограничивать область возможных решений на последующих этапах.

IV. Заключение

Применение принципа Парето-оптимальности при выборе разомкнутой конфигурации участка распределительных электрических сетей напряжением 6-35 кВ позволяет упрощать расчет путем уменьшения числа проверяемых конфигураций сети для последующего многокритериального анализа, например на основе метода последовательных уступок.

Практическая реализация разработанных алгоритмов многокритериальной оптимизации позволит повысить эффективность передачи электроэнергии, что приведет к снижению расхода первичного топлива (газ, уголь, мазут и т.п.) на производство электроэнергии, а также уменьшить возможный ущерб от нарушения электроснабжения потребителей.

© Вуколов В.Ю., 2025

© Жаринов И.В., 2025

Поступила в редакцию 15.08.2025

Принята к публикации 25.08.2025

Received 15.08.2025

Accepted 25.08.2025

Библиографический список

- [1] Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 30.11.2023 г. № 1095 «Об утверждении схемы и программы развития электроэнергетических систем России на 2024 – 2029 годы» // Официальный сайт Министерства энергетики Российской Федерации (Минэнерго России) [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/>
- [2] Вуколов В.Ю., Колесников А.А., Кочеров С.Е., Папков Б.В. Управление конфигурацией распределительных электрических сетей 6-35 кВ по критерию надёжности // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 69. 2018. С. 89-98.
- [3] Куликов А. Л., Шарыгин М. В. Оптимизация частичных отключений мощности активных потребителей путем использования резервов их производственных систем // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2018. № 1. С. 35-45.
- [4] Петрова В.А., Петров А.А. О необходимости учета вероятности отказа агрегата мини-ТЭЦ в момент его запуска при решении задач надежности // Энергобезопасность и энергосбережение. 2018. № 4. С. 48-56. DOI: 10.18635/2071-2219-2018-4-48-56
- [5] Закарюкин В.П., Крюков А.В., Любченко И.А., Черепанов А.В. Улучшение качества электроэнергии в системах электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог, изд. 2-е. М.; Берлин: Директ-Медиа, 2020. – 183 с.
- [6] Гук Ю.Б. Теория надежности в электроэнергетике. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1990. – 208 с.

- [7] Эдельман В.И. Надежность технических систем: экономическая оценка. М.: Экономика, 1988. – 151 с.
- [8] Прусс В.Л., Тисленко В.В. Повышение надежности сельских электрических сетей. Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отд-ние, 1989. – 208с.
- [9] Гусейнов Г.Б. Рейтинговая оценка и регулирование деятельности распределительных электрических сетей в условиях нечеткости. Львов: Издательство Национального университета «Львівська політехніка», 2006.
- [10] Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.
- [11] Guan F.H., Zhao D.M., Zhang X., Shan B.T., Liu Z. Research on distributed generation technologies and its impacts on power system // proc. 2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, Apr. 06-07, 2009, Nanjing, China: IEEE, 2009. DOI: 10.1109/SUPERGEN.2009.5348241
- [12] Keogh E., Chu S., Hart D., Pazzani M. An online algorithm for segmenting time series // proc. 2001 IEEE International Conference on Data Mining, Nov. 29 – Dec. 02, 2001, San Jose, CA, USA: IEEE, 2001. DOI: 10.1109/ICDM.2001.989531
- [13] Montgomery D.C., Runger G.C. Applied Statistics and Probability for Engineers 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2003. – 706 p.
- [14] Overbye T.J., Klump R.P. Effective calculation of power system low-voltage solutions // proc. IEEE PES Winter Power Meeting, 1995.
- [15] Phadke A.G., Thorp J.S. Computer relaying for power systems. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons Inc., 2009.
- [16] Povinelli R. Time series data mining: Identifying temporal patterns for characterization and prediction of time series events: Ph.D. thesis, Marquette University, Milwaukee, Wisconsin, 1999. – 193 p.
- [17] Вуколов В.Ю., Куликов А.Л., Папков Б.В. Повышение эффективности передачи электроэнергии в распределительных сетях. Ч. 1. Библиотечка электротехника. 2013. № 11. 72 с.
- [18] Правила устройства электроустановок (ПУЭ): 7-е изд. М.: ЗАО «Энергосервис», 2007. – 610 с.
- [19] Kulikov A.L., Anan'ev V.V., Vukolov V.Y., Platonov P.S., Lachugin V.F. Modelling of wave processes on power transmission lines to improve the accuracy of fault location // Power Technology and Engineering. 2016. Vol. 49. No. 5. P. 378-385. DOI: 10.1007/s10749-016-0632-8
- [20] Воропай Н.И. [и др.]. Обоснование развития электроэнергетических систем: Методология, модели, методы, их использование. Новосибирск: Наука, 2015. – 448 с.
- [21] Подиновский В.В., Гаврилов В.М. Оптимизация по последовательно применяемым критериям. М.: ЛЕНАНД, 2016. – 194 с.
- [22] Черноруцкий И.Г. Методы оптимизации и принятия решений. С.-Пб.: Лань, 2001. – 384 с.

References

- [1] Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated November 30, 2023 no. 1095 “Ob utverzhdenii skhemy i programmy razvitiya elektroenergeticheskikh sistem Rossii na 2024 – 2029 gody [On approval of the scheme and program for the development of electric power systems of Russia for 2024–2029]”, *Official website*

- of the Ministry of Energy of the Russian Federation (Ministry of Energy of Russia) [Online]. Available at: <https://minenergo.gov.ru/> (in Russian).
- [2] V.Yu. Vukolov, A.A. Kolesnikov, S.E. Kocherov and B.V. Papkov, "Upravlenie konfiguraciej raspreditel'nyh elektricheskikh setej 6-35 kV po kriteriyu nadyozhnosti [Configuration management of 6-35 kV distribution electric networks by reliability criterion]", in *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shikh sistem energetiki [Methodological issues of reliability research of large energy systems]*, N.I. Voropai, Irkutsk, 2018, pp. 89-98 (in Russian).
- [3] A.L. Kulikov and M.V. Sharygin, "Optimization of the load shedding of active consumers through the use of the reserves of their production systems", *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, no. 1, pp. 35-45, 2018.
- [4] V.A. Petrova and A.A. Petrov, "On probable starting failure of mini-CHP for reliability assurance", *Energy Safety and Energy Economy*, no. 4, pp. 48-56, 2018. DOI: 10.18635/2071-2219-2018-4-48-56
- [5] V.P. Zakaryukin, A.V. Kryukov, I.A. Lyubchenko and A.V. Cherepanov, *Uluchshenie kachestva ehlektroehnergii v sistemakh ehlektrosnabzheniya netyagovykh potrebitelej zheleznikh dorog [Improving the quality of electricity in the power supply systems of non-traction railway consumers]*. Moscow, Berlin: DirectMedia, 2020 (in Russian).
- [6] Yu.B. Guk, *Teoriya nadozhnosti v elektroenergetike [Reliability theory in the electric power industry]*. – Leningrad: Energoatomizdat. Leningr. otd., 1990 (in Russian).
- [7] V. I. Edelman, *Nadezhnost tehnikeskikh sistem: ekonomicheskaya otsenka [Reliability of technical systems: an economic assessment]*. Moscow: Ekonomika, 1988 (in Russian).
- [8] V.L. Pruus and V.V. Tislenko, *Povyshenie nadezhnosti sel'skikh elektricheskikh setej [Improving the reliability of rural electric networks]*. Leningrad: Energoatomizdat, Leningradskoe otdelenie, 1989 (in Russian).
- [9] G.B. Huseynov, *Reytingovaya otsenka i regulirovanie deyatel'nosti raspreditel'nykh elektricheskikh setey v usloviyakh nechetkosti [Rating assessment and regulation of electric distribution networks in conditions of fuzziness]*. Lviv: Lvivska politekhnika, 2006 (in Russian).
- [10] I.V. Zhezhlenko and Yu.L. Saenko, *Pokazateli kachestva elektroenergii i ikh kontrol' na promyshlennykh predpriyatiyakh [Electricity quality indicators and their control at industrial enterprises]*. Moscow: Energoatomizdat, 2000 (in Russian).
- [11] F.H. Guan, D.M. Zhao, X. Zhang, B.T. Shan and Z. Liu, "Research on distributed generation technologies and its impacts on power system", in *proc. 2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*, Apr. 06-07, 2009, Nanjing, China. DOI: 10.1109/SUPERGEN.2009.5348241
- [12] E. Keogh, S. Chu, D. Hart and M. Pazzani, "An online algorithm for segmenting time series", in *proc. Proceedings 2001 IEEE International Conference on Data Mining*, Nov. 29 – Dec. 02, 2001, San Jose, CA, USA. DOI: 10.1109/ICDM.2001.989531
- [13] D.C. Montgomery and G.C. Runger, *Applied Statistics and Probability for Engineers*, 3rd ed. New York: John Wiley & Sons Inc., 2003.
- [14] T.J. Overbye and R.P. Klump, Effective calculation of power system low-voltage solutions, in *proc. IEEE PES Winter Power Meeting*, 1995.
- [15] A.G. Phadke and J.S. Thorp, *Computer relaying for power systems*, 2nd ed. New York: John Wiley & Sons Inc., 2009.

- [16] R.J. Povinelli, "Time Series Data Mining: Identifying temporal Patterns for Characterization and Prediction of Time Series Events", Ph. D thesis, Marquette University, Milwaukee, Wsconsin, 1999.
- [17] V.Yu. Vukolov, A.L. Kulikov and B.V. Papkov, "Povyshenie jeffektivnosti peredachi jelektroenergii v raspredelitel'nyh setjah. Ch. 1 [Improving the efficiency of power transmission in distribution networks. Part1]", *Bibliotekha Elektrotehnika [Electrical Engineering Library]*. 2013.No.11 (in Russian).
- [18] *Pravila ustrojstva elektroustanovok [Rules of electrical facilities maintenance]*. Moscow: Energoservis, 2007 (in Russian).
- [19] A.L. Kulikov, V.V. Anan'ev, V.Y. Vukolov, P.S. Platonov and V.F. Lachugin, "Modelling of wave processes on power transmission lines to improve the accuracy of fault location", *Power Technology and Engineering*, vol. 49, no. 5, pp. 378-385, Jan. 2016. DOI: 10.1007/s10749-016-0632-8
- [20] N.I. Voropai et al., *Obosnovanie razvitiya ehlektroehnergeticheskikh sistem: Metodologiya, modeli, metody, ikh ispol'zovanie [Justification of the development of electric power systems: Methodology, models, methods, their use]*. Novosibirsk: Nauka, 2015 (in Russian).
- [21] V.V. Podinovskiy and V.M. Gavrilov, *Optimizatsiya po posledovatel'no primenyayemykh kriteriyam [Optimization according to consistently applied criteria]*. M.: LE-NAND, 2016 (in Russian).
- [22] I.G. Chernorutskiy, *Metody optimizatsii i prinyatiya reshenij [Optimization and decision-making methods]*. Saint Petersburg: Lan, 2001 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Владимир Юрьевич Вуколов, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Vladimir Y. Vukolov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Иван Викторович Жаринов, кандидат технических наук, доцент Дзержинского политехнического института (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Дзержинск, Российская Федерация.

Ivan V. Zharinov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Dzerzhinsky Polytechnic Institute (branch) «Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev», Dzerzhinsk, Russian Federation.