

УДК 629.4.082.3

Расчет вероятности безотказной работы линии электропередачи с учетом внешних воздействий

А. Н. Шилин, О. И. Елфимова, П. Д. Кутейников*

*Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия;
e-mail: suhanov.pavel@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6083-2157>

Информация о статье

Поступила
в редакцию
29.09.2025;

получена
после доработки
13.10.2025;

принята
к публикации
20.10.2025

Ключевые слова:
воздушная линия
электропередачи,
автокластеры, показатели
надежности, внешние
климатические факторы,
поправочные
коэффициенты

Для цитирования

Реферат

При эксплуатации интеллектуальной электрической сети необходима информация о ее надежности, получаемая в ходе мониторинга по выявлению аварийно-опасных участков элементов сети и предотвращению аварий. Расчет вероятности безотказной работы линии электропередачи целесообразно проводить с учетом внешних воздействий на линию. Метод расчета заключается в разбиении линии электропередачи на последовательно соединенные участки, находящиеся в зонах с влиянием различных климатических факторов, с последующим расчетом параметров надежности каждого участка и надежности всей линии как произведения указанных параметров. Влияние внешних условий учитывается с применением коэффициентов. Для исключения вероятности отключения неповрежденных линий при отказе одного участка производится модернизация сети с внедрением автокластерной структуры сети. Данная модернизация заключается в перестройке системы электроснабжения и объединении ее участков в кластеры связанных между собой фидеров, а также удалении устаревших участков сети (ненагруженных ветвей общей сети). Анализ рассчитанных параметров показывает, что учет климатических факторов необходим для получения более достоверных показателей надежности и позволяет выбирать оптимальные решения при управлении интеллектуальными сетями. Внедрение автокластерной структуры помогает в значительной степени повысить надежность электрической сети.

Шилин А. Н. и др. Расчет вероятности безотказной работы линии электропередачи с учетом внешних воздействий. Вестник МГТУ. 2025. Т. 28, № 4/1. С. 539–547. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-4/1-539-547>.

Calculation of the probability of failure-free operation of a power transmission line taking into account external influences

Aleksandr N. Shilin, Olga I. Elfimova, Pavel D. Kuteynikov*

*Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia;
e-mail: suhanov.pavel@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6083-2157>

Article info

Received
29.09.2025;

received
in revised;
13.10.2025;

accepted
20.10.2025

Key words:
overhead power lines,
autoclusters,
reliability indicators,
external climatic factors,
correction factors

For citation

Abstract

When operating a smart grid, reliability information is essential. This information is obtained through monitoring to identify areas of network elements that are susceptible to accidents and to prevent accidents. Calculating the probability of a power line's failure-free operation should be done taking into account external influences on the line. The calculation method involves dividing the power line into successively connected sections located in zones affected by various climatic factors, followed by calculating the reliability parameters of each section and the reliability of the entire line as the product of these parameters. The influence of external conditions is taken into account using coefficients. To eliminate the possibility of disconnecting undamaged lines due to the failure of one section, the network is being modernized with the implementation of an autocluster network structure. This modernization involves restructuring the power supply system and combining its sections into clusters of interconnected feeders, as well as removing obsolete network sections (unloaded branches of the overall network). Analysis of the calculated parameters shows that taking climatic factors into account is necessary to obtain more veracious reliability indicators and enables the selection of optimal solutions for smart grid management. The implementation of an autocluster structure helps significantly improve the reliability of the power grid.

Shilin, A. N. et al. 2025. Calculation of the probability of failure-free operation of a power transmission line taking into account external influences. *Vestnik of MSTU*, 28(4/1), pp. 539–547. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-4/1-539-547>.

Введение

Интеллектуальная сеть (ИС) включает комплекс технических средств, предназначенный для мониторинга и выявления в автоматическом режиме аварийно-опасных мест с последующим изменением конфигурации и параметров данной сети, способствующим ее устойчивому функционированию. К интеллектуальной сети предъявляются требования в части диагностики и восстановления самой себя (Шилин и др., 2011).

При проектировании интеллектуальной электрической сети чрезвычайно важна информация о ее надежности, которая используется для достоверного мониторинга и выявления аварийно-опасных участков элементов сети и предотвращения аварий.

Большинство линий электропередачи являются протяженными, поэтому степень надежности отдельных участков различна. Значительное влияние на надежность линий оказывают внешние условия (наледь, ветровые нагрузки), а также такие факторы, как старение сети в связи со сроком службы, особенности ее маршрута и др. (Конюхова и др., 2001). В ходе исследования произведен расчет вероятности безотказной работы линии электропередачи с учетом внешних воздействий.

Материалы и методы

Влияние различных факторов на надежность сети целесообразно учитывать при расчете с использованием поправочных коэффициентов (Шилин и др., 2014). Таким образом можно упростить расчет интенсивности отказов, вероятности безотказной работы и прочих параметров надежности.

Параметр потока отказов вычисляется по следующей формуле:

$$\omega_{0i} = k_i \omega_0,$$

где ω_0 – параметр потока отказов; k_i – коэффициент, показывающий зависимость от внешних факторов; ω_{0i} – параметр потока отказов с учетом внешних факторов.

Метод расчета заключается в разбиении линий электропередачи на последовательно соединенные участки, находящиеся в разных зонах и подвергающиеся влиянию различных климатических факторов. Затем производится расчет параметров надежности каждого участка и всей линии как произведения найденных ранее параметров участков. Влияние внешних условий учитывается с помощью коэффициентов.

Передача графа между точками i и j вычисляется по формуле

$$L(i, j) = p(i, j) = e^{-\omega_{0i} t},$$

где $L(i, j)$ – передача графа между точками i и j ; $p(i, j)$ – вероятность безотказной работы участка между точками i и j ; $\omega_j = l_{ij} \omega_0 k_j$ – параметр потока отказов с учетом внешних факторов и длины участка; t – период (принимаем $t = 8760$ ч).

Результаты и обсуждение

Для определения коэффициентов и границ зон с влиянием различных факторов используются карты климатических условий (карты ветровых, гололедных и гололедно-ветровых нагрузок). В ходе расчета надежности по данным картам строятся топологические схемы с нанесением на них зон с различными внешними факторами, а также определяются координаты прохождения линий электропередачи через эти зоны.

Топологическая схема воздушной линии электропередачи, выбранной для расчета показателей надежности, изображена на рис. 1 (Шилин и др., 2014).

На данной схеме представлены следующие обозначения:

S_1-S_4 – зоны с различными внешними условиями (гололед, ветер);

a_1 – координата входного узла сети;

b_1-b_{11} – координаты потребителей;

c_1-c_{10} – координаты границ зон.

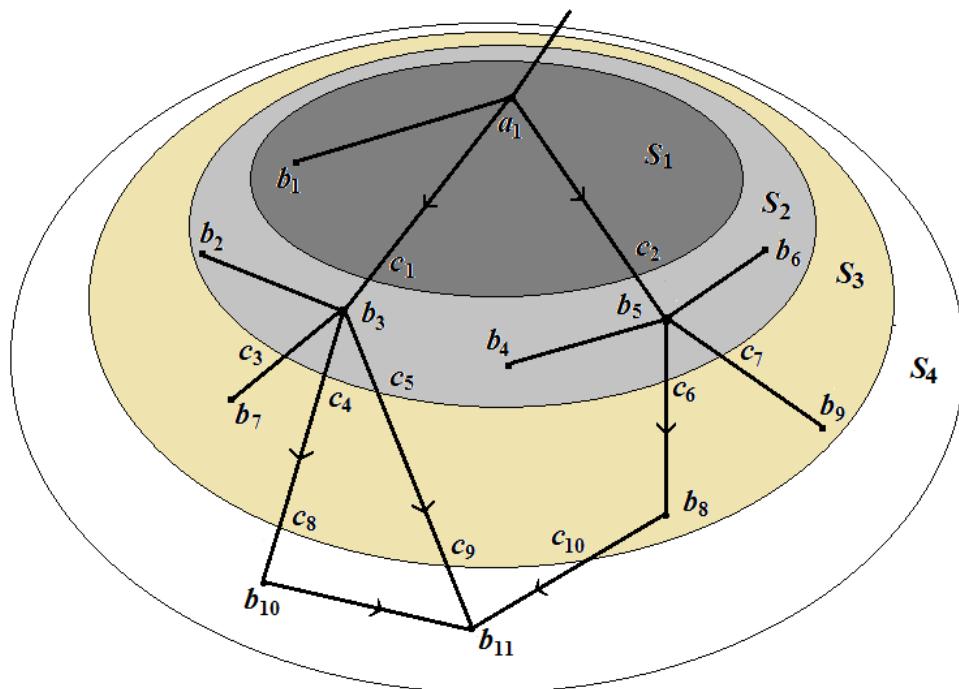


Рис. 1. Топологическая схема электрической сети с выделением зон различных внешних воздействий
Fig. 1. Topological diagram of an electrical network with the allocation of zones of various external influences

Для заданной схемы с помощью эквивалентных преобразований определим вероятность безотказной работы сети при передаче электроэнергии от узла a₁ к узлу b₁₁ (Конюхова и др., 2001).

Все варианты путей графа от узла a₁ к узлу b₁₁ изображены на рис. 2–4.

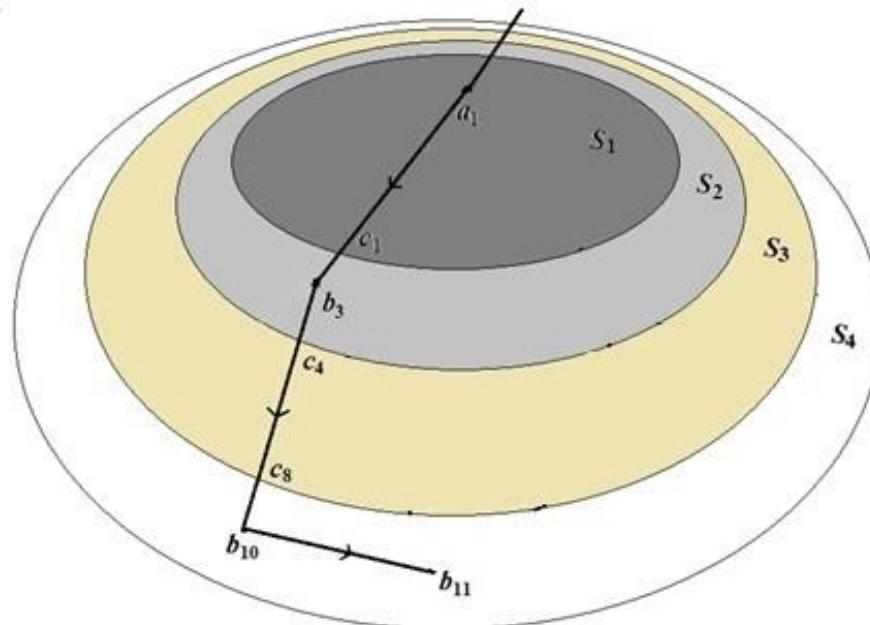


Рис. 2. Первый путь от узла a₁ к узлу b₁₁
Fig. 2. The first path is from node a₁ to node b₁₁

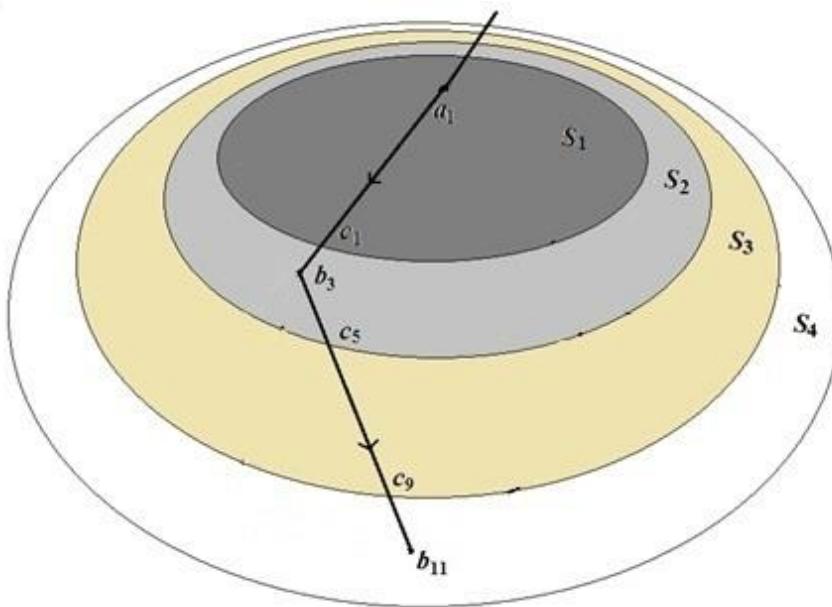


Рис. 3. Второй путь от узла a_1 к узлу b_{11}
Fig. 3. The second path is from node a_1 to node b_{11}

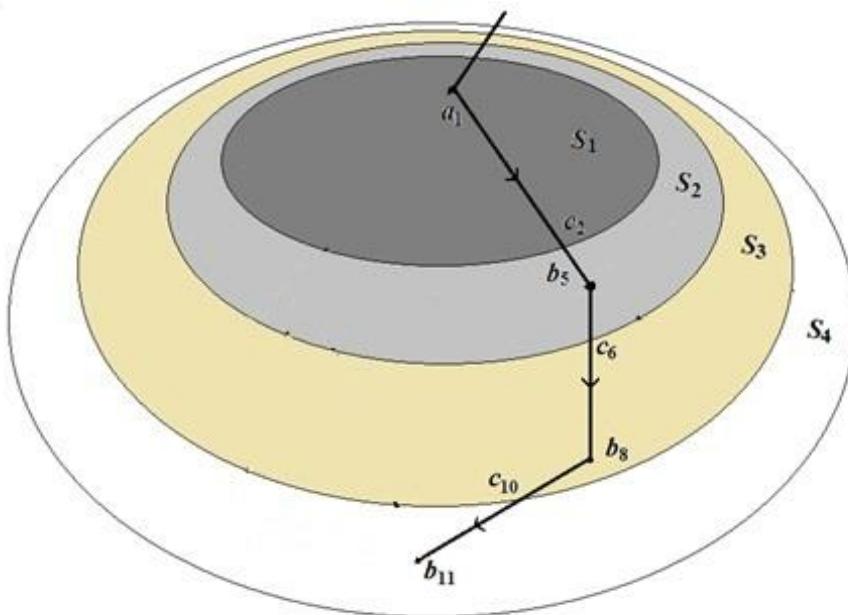


Рис. 4. Третий путь от узла a_1 к узлу b_{11}
Fig. 4. The third path is from node a_1 to node b_{11}

Определим передачи последовательно соединенных ветвей линии:

$$L_1(a_1, b_3) = L(a_1, c_1) \cdot L(c_1, b_3);$$

$$L_2(b_3, b_{11}) = L(b_3, c_4) \cdot L(c_4, c_8) \cdot L(c_8, b_{10}) \cdot L(b_{10}, b_{11});$$

$$L_3(b_3, b_{11}) = L(b_3, c_5) \cdot L(c_5, c_9) \cdot L(c_9, b_{11});$$

$$L_4(a_1, b_{11}) = L(a_1, c_2) \cdot L(c_2, b_5) \cdot L(b_5, c_6) \cdot L(c_6, b_8) \cdot L(b_8, c_{10}) \cdot L(c_{10}, b_{11}).$$

Установим вероятность безотказной работы путей без учета резервирования:

– путь первый: $p_1(a_1, b_{11}) = L_1(a_1, b_3) \cdot L_2(b_3, b_{11})$;

– путь второй: $p_2(a_1, b_{11}) = L_1(a_1, b_3) \cdot L_3(b_3, b_{11})$;

– путь третий: $p_3(a_1, b_{11}) = L_4(a_1, b_{11})$.

Первый и второй путь содержат параллельные ветви $L_2(a_1, b_{11})$ и $L_3(a_1, b_{11})$, а значит, общая вероятность будет определяться так:

$$p_4(a_1, b_{11}) = L_1(a_1, b_3)(L_2(b_3, b_{11}) + L_3(b_3, b_{11}) - L_2(b_3, b_{11})L_3(b_3, b_{11})).$$

Тогда искомая вероятность безотказной работы

$$p(a_1, b_{11}) = p_3(a_1, b_{11}) + p_4(a_1, b_{11}) - p_3(a_1, b_{11})p_4(a_1, b_{11}).$$

Приведем пример расчета надежности; параметр потока отказов взят из справочных данных; результаты сведены в табл. 1¹.

Таблица 1. Расчет по средним показателям
 Table 1. Calculation based on average indicators

Участок сети	Длина линии l_{ij} , км	Параметр потока отказов на 100 км ω_j , 1/год	Вероятность p_{ij} безотказной работы линий между координатами i и j
(a_1, c_1)	32	0,65	0,812207
(c_1, b_3)	6		0,961751
(b_3, c_4)	10		0,937067
(c_4, c_8)	22		0,866754
(c_8, b_{10})	7		0,955552
(b_{10}, b_{11})	30		0,822835
(b_3, c_5)	11		0,930996
(c_5, c_9)	26		0,844509
(c_9, b_{11})	9		0,943178
(a_1, c_2)	30		0,822835
(c_2, b_3)	7		0,955552
(b_5, c_6)	8		0,949329
(c_6, b_8)	18		0,889585
(b_8, c_{10})	14		0,913018
(c_{10}, b_{11})	20		0,878095

Определим передачи графов, находящихся между рассматриваемыми узлами:

$$L_1(a_1, b_3) = 0,7811;$$

$$L_2(b_3, b_{11}) = 0,6386;$$

$$L_3(b_3, b_{11}) = 0,7416;$$

$$L_4(a_1, b_{11}) = 0,5323;$$

$$L_5(a_1, b_{11}) = 0,7082.$$

Установим вероятность безотказной работы путей без учета резервирования:

– путь первый: $p_1(a_1, b_{11}) = 0,4988$;

– путь второй: $p_2(a_1, b_{11}) = 0,5793$;

– путь третий: $p_3(a_1, b_{11}) = 0,5323$.

Вероятность безотказной работы электрической сети по среднему параметру потока отказов без учета влияния климатических факторов, но с учетом резервирования

$$p(a_1, b_{11}) = 0,863523.$$

Далее произведем расчет с учетом внешних факторов, результаты которого представлены в табл. 2–3. Коэффициенты, показывающие влияние внешних факторов на электрическую цепь, получены при проведении статистического анализа аварийности сетей в организации "Волгоградоблэлектро".

Таблица 2. Коэффициенты для учета влияния внешних факторов на электрическую цепь
 Table 2. Coefficients for taking into account the influence of external factors on an electrical circuit

Зона воздействия внешних факторов	Внешние факторы			Поправочный коэффициент
	Гололед	Ветер, гололед	Ветер	
S_1	IV*	IV	IV	1,6
S_2	III	III	IV	1,4
S_3	III	III	III	1,1
S_4	V	IV	IV	1,9

Примечание. *Римскими цифрами обозначена степень интенсивности внешних факторов в данной зоне в соответствии с картами климатических условий.

¹ Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д. Л. Файбисовича. Москва, 2007. 352 с.

Таблица 3. Расчет вероятности безотказной работы электрической сети с учетом коэффициентов
 Table 3. Calculation of the probability of failure-free operation of an electrical network
 taking into account the coefficients

Участок сети	Длина линии l_{ij} , км	Уровень воздействия внешних факторов	Поправочный коэффициент k_i	Параметр потока отказов, ω_j , 1/год	Передача ветви графа p_{ij} между координатами i и j
(a_1, c_1)	32	S_1	1,6	0,2560	0,774142
(c_1, b_3)	6	S_2	1,4	0,0420	0,958870
(b_3, c_4)	10	S_2	1,4	0,0700	0,932394
(c_4, c_8)	22	S_3	1,1	0,1210	0,886034
(c_8, b_{10})	7	S_4	1,9	0,0665	0,935663
(b_{10}, b_{11})	30	S_4	1,9	0,2850	0,752014
(b_3, c_5)	11	S_2	1,4	0,0770	0,925890
(c_5, c_9)	26	S_3	1,1	0,1430	0,866754
(c_9, b_{11})	9	S_4	1,9	0,0855	0,918053
(a_1, c_2)	30	S_1	1,6	0,2400	0,786628
(c_2, b_5)	7	S_2	1,4	0,0490	0,952181
(b_5, c_6)	8	S_2	1,4	0,0560	0,945539
(c_6, b_8)	18	S_3	1,1	0,0990	0,905743
(b_8, c_{10})	14	S_3	1,1	0,0770	0,925890
(c_{10}, b_{11})	20	S_4	1,9	0,1900	0,826959
(b_3, b_2)	18	S_2	1,4	0,1260	0,881615
(b_3, c_3)	9	S_2	1,4	0,0630	0,938943
(b_2, c_{11})	5	S_2	1,4	0,0350	0,965605
(c_{11}, b_7)	11	S_3	1,1	0,0605	0,941294
(c_3, b_7)	9	S_3	1,1	0,0495	0,951705
(b_7, c_{12})	11	S_3	1,1	0,0605	0,941294
(c_{12}, b_{10})	9	S_4	1,9	0,0855	0,918053
(a_1, c_1)	32	S_1	1,6	0,2560	0,774142
(c_1, b_3)	6	S_2	1,4	0,0420	0,958870
(b_3, c_4)	10	S_2	1,4	0,0700	0,932394
(c_4, c_8)	22	S_3	1,1	0,1210	0,886034

Определим передачи графов, находящихся между рассматриваемыми узлами:

$$L_1(a_1, b_3) = 0,7423;$$

$$L_2(b_3, b_{11}) = 0,5813;$$

$$L_3(b_3, b_{11}) = 0,7368;$$

$$L_4(a_1, b_{11}) = 0,4912;$$

$$L_5(a_1, b_{11}) = 0,6605.$$

Установим вероятности безотказной работы путей без учета резервирования:

– путь первый: $p_1(a_1, b_{11}) = 0,4315$;

– путь второй: $p_2(a_1, b_{11}) = 0,5569$;

– путь третий: $p_3(a_1, b_{11}) = 0,4912$.

Вероятность безотказной работы электрической сети с учетом влияния климатических факторов

$$p(a_1, b_{11}) = 0,827238.$$

При прокладке воздушных и кабельных линий по схеме (рис. 2) в случае отказа участка линии, близкого к входному узлу, устройства релейной защиты и автоматики (РЗиА) производят отключение данного участка, в связи с чем отключеными оказываются также и неповрежденные участки в конце линии.

Для исключения вероятности отключения неповрежденных линий при отказе одного участка производится модернизация с внедрением автокластерной структуры сети (Тарасов, 2024). Данная модернизация заключается в перестройке системы электроснабжения и объединении ее участков в кластеры связанных между собой фидеров, а также удалении устаревших участков сети (ненагруженных ветвей общей сети). Данный метод обеспечивает резервирование линий электропередачи (уже зарезервированных), обеспечивающих электроснабжение потребителей, что повышает вероятность безотказной работы по сравнению со стандартной радиальной схемой.

При модернизации сети посредством корректировки топологии устраняются избыточные ее участки, а также участки низкой нагрузки и участки с неоптимальными режимами работы, повышается качество и надежность электроснабжения оставшихся в сети потребителей.

Для проверки целесообразности данного метода в схему сети (рис. 1) внедряется автокластер, в результате чего она приобретает вид, представленный на рис. 5.

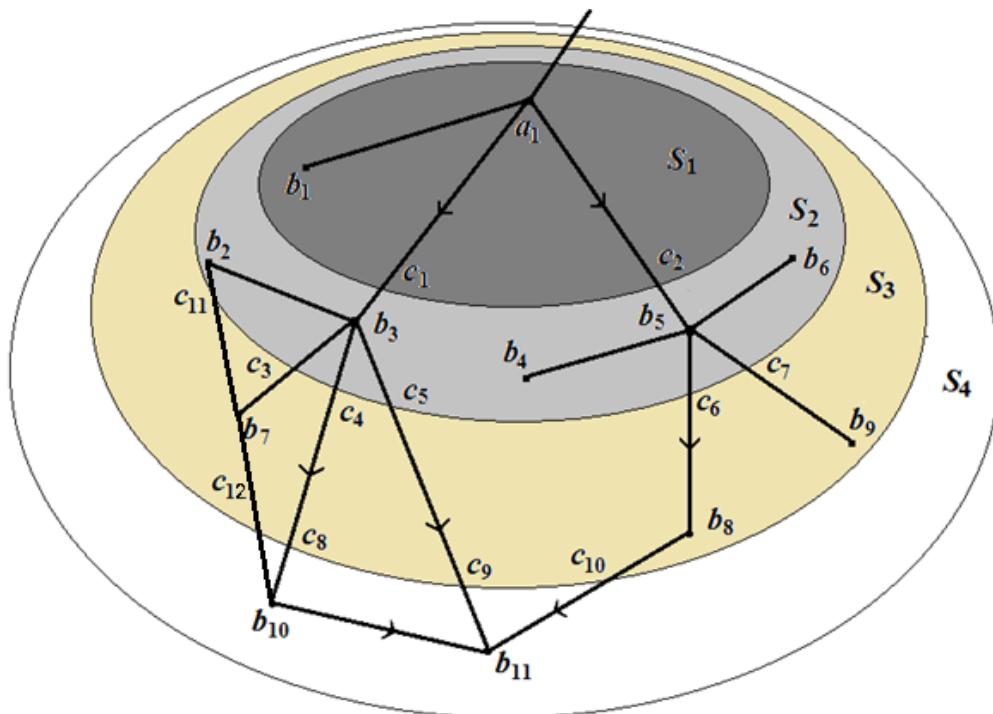


Рис. 5. Схема с внедрением автокластера
 Fig. 5. Scheme with the implementation of an autocluster

Как видно из данной схемы, к искомому фидеру b_{11} ведут дополнительные пути:

$$L_6(b_3, b_{11}) = L(b_3, c_3) \cdot L(c_3, b_7) \cdot L(b_7, c_{12}) \cdot L(c_{12}, b_{10}) \cdot L(b_{10}, b_{11}) = 0,581;$$

$$L_7(b_3, b_{11}) = L(b_3, b_2) \cdot L(b_2, c_{11}) \cdot L(c_{11}, b_7) \cdot L(b_7, c_{12}) \cdot L(c_{12}, b_{10}) \cdot L(b_{10}, b_{11}) = 0,521.$$

Установим следующие вероятности безотказной работы:

– путь первый: $p_1(a_1, b_{11}) = L_1(a_1, b_3) \cdot L_2(b_3, b_{11}) = 0,432$;

– путь второй: $p_2(a_1, b_{11}) = L_1(a_1, b_3) \cdot L_3(b_3, b_{11}) = 0,557$;

– путь третий: $p_3(a_1, b_{11}) = L_4(a_1, b_{11}) = 0,491$;

– путь четвертый: $p_4(a_1, b_{11}) = L_1(a_1, b_3) \cdot L_6(b_3, b_{11}) = 0,431$;

– путь пятый: $p_5(a_1, b_{11}) = L_1(a_1, b_3) \cdot L_7(b_3, b_{11}) = 0,387$.

Поскольку пути $L_2(b_3, b_{11})$, $L_3(b_3, b_{11})$, $L_6(b_3, b_{11})$ и $L_7(b_3, b_{11})$ параллельны друг другу, их вероятность будет определяться по формуле

$$p_6(a_1, b_{11}) = L_1(a_1, b_3) \cdot L_8(b_3, b_{11}) = 0,726,$$

где $L_8(b_3, b_{11}) = L_7(b_3, b_{11}) + (L_6(b_3, b_{11}) + (L_2(b_3, b_{11}) + L_3(b_3, b_{11}) - L_2(b_3, b_{11}) \cdot L_3(b_3, b_{11})) - L_6(b_3, b_{11}) \cdot (L_2(b_3, b_{11}) + L_3(b_3, b_{11}) - L_2(b_3, b_{11}) \cdot L_3(b_3, b_{11})) - L_6(b_3, b_{11}) \cdot (L_2(b_3, b_{11}) + L_3(b_3, b_{11}) - L_2(b_3, b_{11}) \cdot L_3(b_3, b_{11})) = 0,978$.

Тогда общая вероятность безотказной работы сети при передаче электроэнергии от узла a_1 к узлу b_{11} равна

$$p(a_1, b_{11}) = p_3(a_1, b_{11}) + p_6(a_1, b_{11}) - p_3(a_1, b_{11}) \cdot p_6(a_1, b_{11}) = 0,861.$$

Исходя из расчета, можно сделать вывод о том, что вероятность безотказной работы схемы повысилась. Для краткости расчета в схему был введен только один кластер, но при увеличении их количества вероятность безотказной работы будет возрастать.

Результаты всех расчетов вероятности безотказной работы (табл. 4) свидетельствуют о целесообразности учета внешних факторов в процессе расчета вероятности безотказной работы, что позволяет сделать более корректные выводы о надежности сети и предпринять определенные меры при ее проектировании. Внедрение автокластерной системы повышает вероятность безотказной работы и общую надежность сети.

Таблица 4. Результаты расчета вероятности безотказной работы
Table 4. Results of the calculation of the failure-free operation probability

Схема	Вероятность безотказной работы
– без внедрения автокластерной системы, без учета внешних факторов	0,864
– без внедрения автокластерной системы, с учетом внешних факторов	0,827
– с внедрением автокластерной системы, с учетом внешних факторов	0,861

Заключение

Анализ показывает, что учет климатических факторов необходим для получения более достоверных показателей надежности и позволяет выбирать оптимальные решения при управлении интеллектуальными сетями.

При внедрении автокластерной структуры сети повышается надежность снабжения потребителей электрической энергии благодаря дополнительному косвенному резервированию линий электропередачи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Конюхова Е. А., Киреева Э. А. Надежность электроснабжения промышленных предприятий. М. : Энергопресс, 2001. 91 с.
- Тарасов А. В. Эффекты при модернизации распределительной сети электроснабжения с внедрением автокластерной структуры // Всероссийская школа молодых ученых "Цифровизация, декарбонизация и децентрализация современной электроэнергетики", Севастополь, 29–30 мая 2024 г. : сб. науч. тр. Севастополь : СевГУ, 2024. С. 146–157. EDN: KDNQYS.
- Шилин А. Н., Доронина О. И. Оценка надежности воздушных линий электропередачи с дифференциацией влияния климатических факторов // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2014. № 18(145). С. 76–80. EDN: TBAUFT.
- Шилин А. Н., Шилин А. А. Интеллектуальные электрические сети: проблемы и решения // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2011. № 8(81). С. 84–88. EDN: OJXWBF.

References

- Konyukhova, E. A., Kireeva, E. A. 2001. Reliability of power supply of industrial enterprises. Moscow. (In Russ.)
- Tarasov, A. V. 2024. Effects of modernizing the electricity distribution network with the implementation of an autocluster structure. Coll. of articles *Digitalization, Decarbonization, and Decentralization of the Modern Electric Power Industry*, Sevastopol, May 29–30, 2024. Sevastopol, pp. 146–157. EDN: KDNQYS. (In Russ.)
- Shilin, A. N., Doronina, O. I. 2014. Reliability assessment of overhead power lines with differentiation of the influence of climatic factors. *Izvestia Volgograd State Technical University*, 18(145), pp. 76–80. EDN: TBAUFT. (In Russ.)
- Shilin, A. N., Shilin, A. A. 2011. Smart power grids: Problems and solutions. *Izvestia Volgograd State Technical University*, 8(81), pp. 84–88. EDN: OJXWBF. (In Russ.)

Сведения об авторах

Шилин Александр Николаевич – пр. Ленина, 28, г. Волгоград, Россия, 400005;
Волгоградский государственный технический университет, д-р техн. наук, профессор;
e-mail: eltech@vstu.ru

Aleksandr N. Shilin – 28 Lenin Ave., Volgograd, Russia, 400005;
Volgograd State Technical University, Dr Sci. (Engineering), Professor;
e-mail: eltech@vstu.ru

Елфимова Ольга Ивановна – пр. Ленина, 28, г. Волгоград, Россия, 400005;
Волгоградский государственный технический университет, канд. техн. наук, доцент;
e-mail: olgai-karpenko@yandex.ru

Olga I. Elfimova – 28 Lenin Ave., Volgograd, Russia, 400005;
Volgograd State Technical University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: olgai-karpenko@yandex.ru

Кутейников Павел Дмитриевич – пр. Ленина, 28, г. Волгоград, Россия, 400005;
Волгоградский государственный технический университет, аспирант;
e-mail: suhanov.pavel@inbox.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6083-2157>

Pavel D. Kuteynikov – 28 Lenin Ave., Volgograd, Russia, 400005;
Volgograd State Technical University, PhD Student;
e-mail: suhanov.pavel@inbox.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6083-2157>