

УДК 621.311

ББК 31.27

Р.М. ПЕТРОВА, Е.И. ГРАЧЕВА

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ СХЕМ ВНУТРИЦЕХОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРИСОЕДИНЕНИЙ

Ключевые слова: система внутрицехового электроснабжения, вероятность времени безотказной работы, распределительный пункт, коэффициент присоединения.

В статье рассматривается метод упрощения прогнозирования параметров надежности и оценки технического состояния наиболее ответственных узлов системы электроснабжения с помощью коэффициентов присоединений.

Целью исследования является разработка методики определения вероятности безотказной работы схемы электроснабжения с помощью коэффициентов присоединений.

Материалы и методы. Представлена схема внутрицехового электроснабжения 10/0,4 кВ. Используются вероятностные методы определения надежности и методы математической статистики.

Результаты исследования. Произведен расчет вероятности безотказной работы во времени с использованием экспоненциального закона распределения. Представлены графики зависимостей вероятности времени безотказной работы системы от числа присоединений нагрузки, а также графики изменения значений коэффициентов присоединений во времени. Выведены формулы коэффициентов присоединений нагрузки в зависимости от числа присоединений. Полученные аналитические выражения позволяют получать значения коэффициентов присоединений при возможных дополнительных присоединениях нагрузки, полученные зависимости – определять вероятность времени безотказной работы низковольтного электрооборудования, а также схем внутрицехового электроснабжения.

Выводы. Предложенная методика упрощает прогнозирование параметров надежности схемы внутрицехового электроснабжения и оценку технического состояния наиболее ответственных и критических ее узлов. Смоделированные значения коэффициентов присоединений нагрузки могут быть использованы в технико-экономических расчетах, а именно для дальнейшего увеличения числа отходящих линий от распределительного шкафа и распределительного пункта или увеличения нагрузки на линию с учетом допустимой вероятности безотказной работы схемы. Результаты исследования рекомендованы для оценки технических показателей и определения основных параметров надежности эксплуатируемых систем внутрицехового электроснабжения.

Введение. В современных условиях эксплуатации, как правило, при выходе из строя низковольтного электротехнического оборудования для крупных производственных предприятий частым решением является замена оборудования на новое, а не ремонт и продление эксплуатационного срока службы [8]. При этом существует возможность повышения точности прогнозных оценок технического состояния низковольтного электрооборудования и разработки необходимых мероприятий для обеспечения эффективного функционирования систем внутрицехового электроснабжения [8]. Ниже представлен краткий литературный обзор некоторых научных работ ученых, занимающихся исследованиями в данной области.

В работе И.З. Багаутдинова представлены расчет надежности вычислительных комплексов и систем технических средств и расчет вероятности безотказной работы изделия [1].

И.К. Будникова и Е.В. Приймак создали программное обеспечение для автоматизации процесса моделирования показателей надежности работы электрических подстанций [2]. Ф.Л. Бык и соавт. разработали методику расчета прогнозных значений показателей бесперебойности электроснабжения, применяемую в распределительных сетях 0,4–10 кВ. Методика позволяет сравнивать эффективность внедрения различных мероприятий, основываясь на изменениях структурных и функциональных характеристик надежности распределительной системы [3].

В.И. Зацепина и С.С. Астанин провели исследование проблемы надежности систем релейной защиты и автоматики, а также разработали математические зависимости, позволяющие произвести оценку отказоустойчивости системы электроснабжения на стадии проектирования. Это, в свою очередь, способствует упрощению процесса выбора оптимальной системы [4].

Е.Ж. Куатов и Н.Г. Жумашев усовершенствовали методы прогнозирования параметров надежности [6]. А.В. Попов при исследовании вопроса эксплуатационной надежности на примере асинхронных электродвигателей применил метод структурно-функциональных моделей, позволяющий формировать вероятностно-статистические функции уравнения отказов [7].

Р.Р. Садыков представил методику оценки основных показателей надежности радиальных схем на примере цехового электроснабжения в процессе эксплуатации, смоделировал изменение вероятности времени безотказной работы распределительных устройств на стороне низкого напряжения в зависимости от количества присоединений потребителей [9].

Ю.А. Секретаревым и соавт. произведено исследование влияния текущего технического состояния элементов схемы на надежность системы электроснабжения, для расчета которой применены элементы теории вероятностей [10]. А.Н. Шпиганович и соавт. разработали алгоритм анализа надежности систем электроснабжения со смешанным соединением элементов [11].

R. Gono et al. исследовали параметры надежности элементов распределительных систем, а также возможности оптимизации технического обслуживания систем электроснабжения [12].

В. He et al. изучили факторы, влияющие на надежность электроснабжения интеллектуальной распределительной сети, предложили реализовать автоматическую блокировку распределительной сети по числу оптимизации узлов и исследовать надежность электроснабжения распределительной сети по блокам [13].

Z. Li et al. предложили метод количественной оценки риска энергосистемы с использованием Байесовских сетей, на основе которого устанавливаются показатели для оценки надежности системы, а также показатели, оказывающие влияние на надежность энергосистемы [14].

C. Pan et al. предложили комплексную модель управления надежностью и произвели аналитическую оценку рисков для точного прогнозирования поведения энергосистемы [15].

Z. Ruifeng et al. предложили метод оценки надежности электроснабжения потребителей распределительной сети низкого напряжения. Данный метод позволяет оптимизировать фактическую надежность сети, а также управлять качеством электроэнергии на основе данных состояния работы сети [16].

X. Tang et al. рассмотрели вопрос надежности при планировании энергосистемы и предложили модель энергетической системы с учетом согласования экономически надежных аспектов и характеристик отказов [17].

Y. Wang et al. представили вероятностный подход к оценке надежности энергосистемы. Для учета условий работы системы в предлагаемом подходе используется последовательное моделирование Монте-Карло, формулируются вероятностные модели надежности. Предложенный подход продемонстрирован на тестовой энергосистеме [18].

Из краткого литературного обзора можно сделать вывод, что исследованию надежности низковольтного электрооборудования, а также систем электроснабжения посвящено много работ. Данная тема является актуальной и имеет широкое практическое применение на производственных предприятиях. Но для повышения надежности схем внутрицехового электроснабжения также можно применить метод коэффициентов присоединений, который не был ранее рассмотрен другими исследователями. Отличие предложенного метода состоит в упрощении моделирования надежности и прогнозирования технического состояния узлов энергосистемы.

Целью исследования является разработка методики определения вероятности безотказной работы схемы электроснабжения с помощью коэффициентов присоединений.

Научной значимостью исследования является усовершенствование методов определения вероятности безотказной работы схемы внутрицехового электроснабжения с помощью коэффициентов присоединений.

Материалы и методы. На рис. 1 представлена схема внутрицехового электроснабжения 10/0,4 кВ.

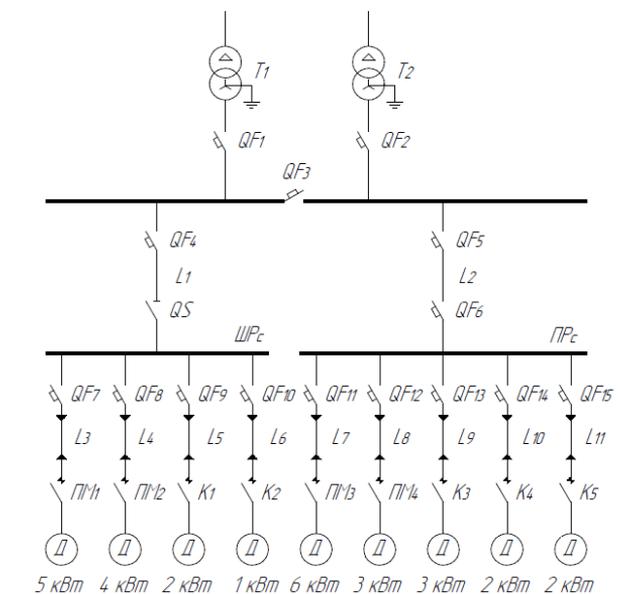


Рис. 1. Расчетная схема внутрицехового электроснабжения

В табл. 1 приведены исходные данные для расчетной схемы (рис. 1).

Таблица 1

Исходные данные для схемы внутрицехового электроснабжения

Элемент схемы	Марка	Завод-изготовитель, город
Трансформаторы T_1, T_2	ТМ-1600/10/0,4	ЭЛТЕХКОМ, г. Н. Новгород
Автоматические выключатели QF_1-QF_6	ВА51-39	Курский электроаппаратный завод (КЭАЗ), г. Курск
Автоматические выключатели QF_7-QF_{15}	ВА51-35	
Разъединитель QS	РЕ19-37	
Магнитные пускатели ПМ ₁ -ПМ ₄	ПМЛ-1100	
Контакты K_1-K_5	КТ-6000	ЭКСПЕРТ-КАБЕЛЬ, г. Орел, Москва, Екатеринбург
Кабели L_1-L_2 (номинальное напряжение 0,4 кВ; сечение $S = 16 \text{ мм}^2$; длина $L = 10 \text{ м}$)	АВВГ	
Кабели L_3-L_{11} (номинальное напряжение 0,4 кВ; сечение $S = 4 \text{ мм}^2$; длина $L = 1,5 \text{ м}$)	АВВГ	АБСОЛЮТЭНЕРГО, г. Пермь
Щкаф распределительный силовой (ЩРС)	ЩРС-1	
Пункт распределительный силовой (ПРС)	ПР-11	

Результаты исследования. Определим изменение вероятности времени безотказной работы $P(t)$ для ветви ПРС (рис. 1) в зависимости от количества присоединенных к ней нагрузок D .

Авторами статьи ранее проведен расчет интенсивности отказов кабельной линии 0,4 кВ в зависимости от ее длины и получены результаты оценки надежности работы электрооборудования систем внутрицехового электроснабжения на примере схемы участка цеховой сети¹. В табл. 2 приведены расчетные данные для каждого элемента схемы (рис. 1).

Таблица 2

Расчетные данные

Элемент схемы	Интенсивность отказов (λ), 1/год	Вероятность безотказной работы во времени $P(t)$						
		$t = 1 \text{ год}$	$t = 2 \text{ года}$	$t = 3 \text{ года}$	$t = 4 \text{ года}$	$t = 5 \text{ лет}$	$t = 6 \text{ лет}$	$t = 7 \text{ лет}$
T_2	0,015	0,985	0,970	0,956	0,942	0,928	0,914	0,900
QF_2	0,051	0,950	0,903	0,858	0,815	0,775	0,736	0,700
L_2	0,026	0,974	0,949	0,925	0,901	0,878	0,856	0,834
QF_5	0,051	0,950	0,903	0,858	0,815	0,775	0,736	0,700
QF_6	0,051	0,950	0,903	0,858	0,815	0,775	0,736	0,700
ПРС	0,001	0,999	0,998	0,997	0,996	0,995	0,994	0,993
L_7	0,026	0,974	0,949	0,925	0,901	0,878	0,856	0,834
QF_{11}	0,051	0,950	0,903	0,858	0,815	0,775	0,736	0,700
ПМ ₃	0,095	0,909	0,827	0,752	0,684	0,622	0,566	0,514
L_8	0,026	0,974	0,949	0,925	0,901	0,878	0,856	0,834
QF_{12}	0,051	0,950	0,903	0,858	0,815	0,775	0,736	0,700
ПМ ₄	0,095	0,909	0,827	0,752	0,684	0,622	0,566	0,514
L_9	0,026	0,974	0,949	0,925	0,901	0,878	0,856	0,834
QF_{13}	0,051	0,950	0,903	0,858	0,815	0,775	0,736	0,700
K_3	0,098	0,907	0,822	0,745	0,676	0,613	0,555	0,504
L_{10}	0,026	0,974	0,949	0,925	0,901	0,878	0,856	0,834
QF_{14}	0,051	0,950	0,903	0,858	0,815	0,775	0,736	0,700
K_4	0,098	0,907	0,822	0,745	0,676	0,613	0,555	0,504
L_{11}	0,026	0,974	0,949	0,925	0,901	0,878	0,856	0,834
QF_{15}	0,051	0,950	0,903	0,858	0,815	0,775	0,736	0,700
K_5	0,098	0,907	0,822	0,745	0,676	0,613	0,555	0,504

¹ Петрова Р.М., Грачева Е.И., Valtchev S., Мифтахова Н.К. Методы оценки надежности схем внутрицехового электроснабжения // Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 4. С. 395–409. DOI: 10.21443/1560-9278-2023-26-4-395-409.

Для расчетов вероятности безотказной работы во времени $P(t)$ используем экспоненциальный закон, так как интенсивность отказов λ является величиной постоянной, а отказы носят внезапный характер [5]:

$$P(t) = e^{-\lambda \cdot t},$$

где λ – интенсивность отказов, 1/год; t – время, год.

Оценим вероятность оперативных включений-отключений схемы (рис. 1), когда в случае отказа электрооборудования в присоединении (рис. 2) производится отключение всего ПРС на время восстановительного ремонта электротехническим персоналом.

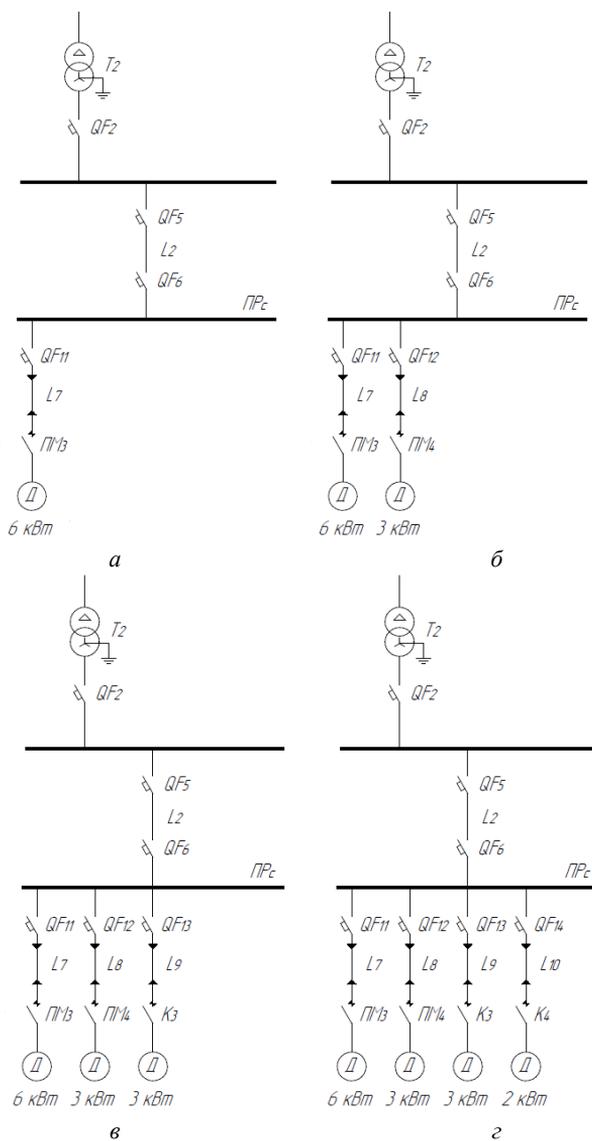


Рис. 2. Расчетная схема ПРС с одним (а), двумя (б), тремя (в) и четырьмя (г) присоединениями нагрузки

На рис. 2, а представлена схема ПРС с одним подключенным присоединением нагрузки. Для первого года эксплуатации вероятность времени безотказной работы:

$$P_{\text{ПРС}1} = P_{T_2} P_{QF_2} P_{QF_3} P_{L_2} P_{QF_6} P_{\text{ПРС}} P_{QF_{11}} P_{L_7} P_{\text{ПМ}_3} = P_T P_{OF}^4 P_L^2 P_{\text{ПРС}} P_{\text{ПМ}} = \\ = 0,985 \cdot 0,950^4 \cdot 0,974^2 \cdot 0,999 \cdot 0,909 = 0,691.$$

Аналогично рассчитываются вероятности безотказной работы $P_{\text{ПРС}}$ при $t = 2, 3, \dots, 7$ лет.

Далее рассчитаем $P_{\text{ПРС}2}(t)$ для 1-го и 2-го присоединений нагрузки (рис. 2, б); $P_{\text{ПРС}3}(t)$ – для 1–3-го (рис. 2, в); $P_{\text{ПРС}4}(t)$ – для 1–4-го (рис. 2, г) и $P_{\text{ПРС}5}(t)$ – для 1–5-го (см. ветвь ПРС на рис. 1).

На рис. 3 приведены графики изменения вероятности времени безотказной работы $P_{\text{ПРС}}(t)$ во времени от количества присоединений нагрузки Д к распределительному пункту.

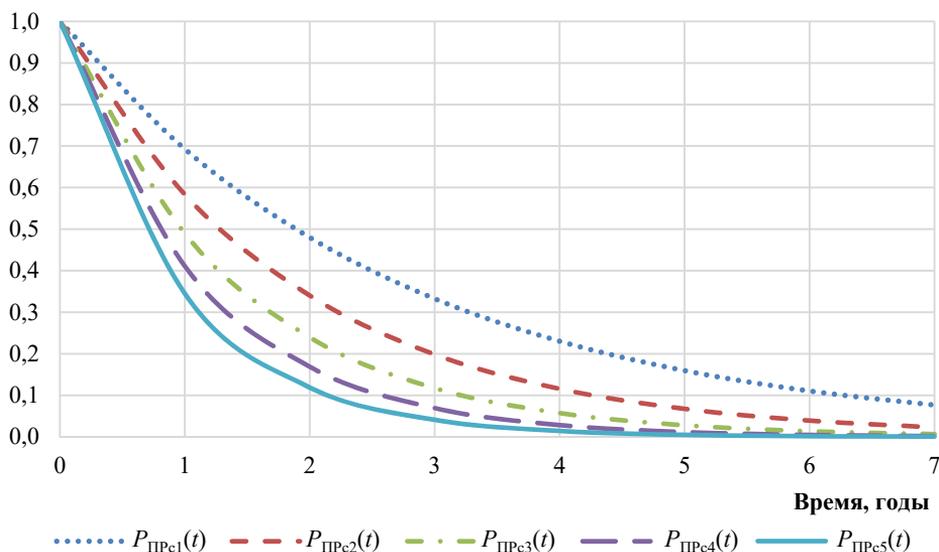


Рис. 3. Изменения вероятности времени безотказной работы $P_{\text{ПРС}}(t)$ в зависимости от числа присоединений нагрузки Д

Графики показывают, что $P_{\text{ПРС}}(t)$ резко снижается после 1 года эксплуатации схемы, поэтому требуются проведение регулярного технического обслуживания и возможный вывод электрооборудования в ремонт. Проведенные исследования показывают, что при наблюдаемых фактических режимах эксплуатации схемы необходимы контроль технического состояния электрических аппаратов и своевременная замена электрооборудования до появления отказов. Так как линии цеховой сети в типовых схемах, как правило, имеют одинаковый набор элементов электрооборудования, введем понятие показателя «коэффициент присоединения», который позволяет определить присвоенное значение $P_{\text{ПРС}2}(t)$, $P_{\text{ПРС}3}(t)$, $P_{\text{ПРС}4}(t)$ и $P_{\text{ПРС}5}(t)$, используя значение исходной переменной $P_{\text{ПРС}1}(t)$.

По полученным данным определим коэффициенты присоединений $K_{\text{ПР}1}$, $K_{\text{ПР}2}$, $K_{\text{ПР}3}$ и $K_{\text{ПР}4}$.

Если в схеме имеются k присоединений нагрузки Д (рис. 2, б), то имеет место следующее равенство:

$$P_{\text{ПР}k}(t) = K_{\text{ПР}k-1} \cdot P_{\text{ПР}k-1}(t),$$

где $P_{\text{ПР}k-1}(t)$, $P_{\text{ПР}k}(t)$ – вероятности безотказной работы одного и k присоединений нагрузки Д во времени для распределительного пункта соответственно; $K_{\text{ПР}k-1}$ – коэффициент вероятностей указанных присоединений; $k = 2, 3, \dots, 5$.

Тогда коэффициент вероятностей указанных присоединений рассчитывается по отношению к первому присоединению

$$K_{\text{ПР}k-1} = \frac{P_{\text{ПР}k}(t)}{P_{\text{ПР}k-1}(t)}.$$

Полученные графики изменения значений коэффициентов присоединений $K_{\text{ПР}1}(t)$, $K_{\text{ПР}2}(t)$, $K_{\text{ПР}3}(t)$ и $K_{\text{ПР}4}(t)$ и смоделированное значение $K_{\text{ПР}5}(t)$ при возможном шестом присоединении нагрузки Д представлены на рис. 4.

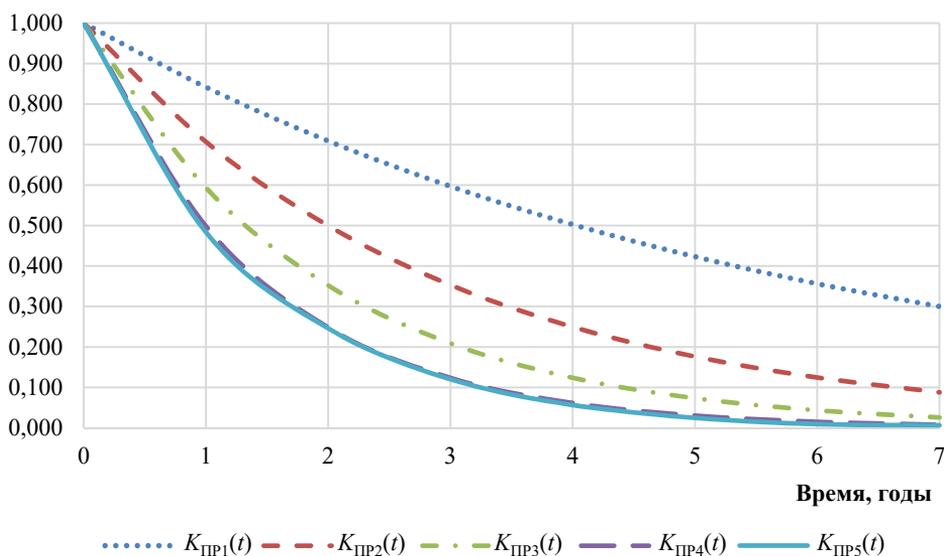


Рис. 4. Изменения значений коэффициентов присоединений $K_{\text{ПР}1}$, $K_{\text{ПР}2}$, $K_{\text{ПР}3}$ и $K_{\text{ПР}4}$ и смоделированного значения $K_{\text{ПР}5}$ в зависимости от времени t

Выводы. Предложенная методика упрощает прогнозирование параметров надежности схемы внутрицехового электроснабжения и оценку технического состояния наиболее ответственных и критических ее узлов.

Полученные графики изменений значений коэффициентов присоединений во времени (рис. 4) позволяют определять вероятность безотказной работы во времени низковольтного электрооборудования, а также схем внутрицехового электроснабжения. Метод определения вероятности безотказной работы с помощью коэффициентов присоединений нагрузки позволяет с требуемой точностью

спрогнозировать уровень надежности схемы электроснабжения в зависимости от количества отходящих линий распределительного шкафа силового и распределительного пункта при ее проектировании и вводе в эксплуатацию.

Формула для вычисления коэффициентов присоединений нагрузки $K_{пр}$ может быть использована в технико-экономических расчетах для определения максимально допустимого количества отходящих линий от распределительного силового шкафа и распределительного силового пункта или максимальной нагрузки на линию с учетом допустимой вероятности безотказной работы схемы, а также при уточнении сроков технического обслуживания, планово-предупредительного и капитального ремонтов электрооборудования. Результаты исследования могут быть использованы для оценки технических показателей и определения основных параметров надежности эксплуатируемых систем внутрицехового электроснабжения.

Литература

1. Багаутдинов И.З. Расчет надежности // Теория и практика современной науки. 2017. № 4(22). С. 96–99.
2. Будникова И.К., Приймак Е.В. Компьютерное моделирование показателей надежности систем электроснабжения // Вестник Казанского технологического университета. 2017. № 5. С. 76–79.
3. Бык Ф.Л., Какоша Ю.В., Мышкина Л.С. Фактор надежности при проектировании распределительной сети // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2020. № 6. С. 43–54.
4. Зацепина В.И., Астанин С.С. Анализ надежности системы электроснабжения с учетом отказоустойчивости релейной защиты // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2020. № 4. С. 564–570.
5. Конюхова Е.А., Куреева Э.А. Надежность электроснабжения промышленных предприятий // Библиотечка электротехника. Вып. 12(36). М.: НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», 2001. 93 с.
6. Куатов Е.Ж., Жумашиев Н.Г. Принципы математического моделирования и прогнозирования надежности электрических машин // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». 2016. № 1. С. 158–160.
7. Попов А.В. Исследование и совершенствование методов расчета надежности элементов электротехнических комплексов и систем // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2015. № 3-4. С. 114–123.
8. Работоспособность и надежность электрических контактов / Э.Ю. Абдуллазянов, Е.И. Грачева, А.Р. Петров и др. Казань: Отечество, 2024. 126 с.
9. Садыков Р.Р. Оценка надежности низковольтных цеховых сетей промышленного электроснабжения // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2017. № 5-6. С. 98–108.
10. Секретарев Ю.А., Горшунов А.А., Меняйкин Д.А. Моделирование технического состояния оборудования систем электроснабжения монопотребителей с учетом схемной надежности // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2022. Т. 18, № 3(69). С. 3–14. DOI: 10.53015/18159958_2022_18_3_3.
11. Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А., Квашина Г.В. Обеспечение надежности функционирования систем электроснабжения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. №12-3. С. 93–102.
12. Gono R., Rusek S., Kratky M. et al. Reliability analysis of electric distribution system. In: 2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Rome, Italy, 2011, pp. 1–4. DOI: 10.1109/EEEIC.2011.5874842.
13. He B., Liang Y., Xie J. Research on Power Supply Reliability of Intelligent Distribution Network with Automatic Blocking Evaluation. In: 2024 IEEE 3rd International Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms (EEBDA), Changchun, China, 2024, pp. 207–210. DOI: 10.1109/EEBDA60612.2024.10485856.

14. Li Z., Liang D., Wang J. et al. A Data-driven Technique Based on Power System Reliability Assessment. In: 2023 3rd Power System and Green Energy Conference (PSGEC), Shanghai, China, 2023, pp. 576–581. DOI: 10.1109/PSGEC58411.2023.10255984.

15. Pan C. Reliability-Constrained Economic Dispatch with Analytical Formulation of Operational Risk Evaluation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2024, vol. 39, no. 2, pp. 4422–4436. DOI: 10.1109/TPWRS.2023.3317973.

16. Ruifeng Z., Shuqing H., Donglin D. et al. Low Voltage Power Supply Reliability Evaluation of Distribution Network Based on Data Quality Governance. In: 2020 4th International Conference on Power and Energy Engineering (ICPEE), Xiamen, China, 2020, pp. 75–78. DOI: 10.1109/ICPEE51316.2020.9311017.

17. Tang X., Luo N., He X. et al. Energy Production Element Planning of Integrated Gas and Power systems Considering the Coordination between Economic and Reliability. In: 2021 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), Chongqing, China, 2021, pp. 1740–1745. DOI: 10.1109/ACPEE51499.2021.9436885.

18. Wang Y., Vittal V., Khorsand M. et al. Composite System Reliability Evaluation With Essential Reliability Services Assessment of Wind Power Integrated Power Systems. In: IEEE Open Access Journal of Power and Energy, 2020, vol. 7, pp. 403–413. DOI: 10.1109/OAJPE.2020.3029119.

ПЕТРОВА РЕНАТА МАРАТОВНА – аспирантка кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Казанский государственный энергетический университет, Россия, Казань (1998renata@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2508-8771>).

ГРАЧЕВА ЕЛЕНА ИВАНОВНА – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Казанский государственный энергетический университет, Россия, Казань (grachieva.i@bk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>).

Renata M. PETROVA, Elena I. GRACHEVA
ALGORITHM FOR CALCULATING RELIABILITY
OF ON-SITE POWER SUPPLY SCHEMES
USING CONNECTION COEFFICIENTS

Key words: *in-plant power supply system, probability of failure-free operation time, distribution point, connection coefficient.*

The article deals with the method of simplifying the forecasting of reliability parameters and assessing the technical condition of the most critical nodes of the power supply system by means of connection coefficients.

The aim of the study is to develop a methodology to determine the probability of failure-free operation of the power supply scheme using connection coefficients.

Materials and methods. The scheme of 10/0,4 kV power supply within the workshop is presented. Probabilistic methods of reliability determination and mathematical statistics were used.

Research results. The probability of failure-free operation in time using the exponential distribution law has been calculated. Graphs of dependences of probability of system uptime on the number of load connections, as well as graphs of changes in the values of connection coefficients in time are presented. The formulas for the load connection factors depending on the number of connections are derived. The received analytical expressions allow to model values at possible additional load connections. The obtained dependences allow to determine the probability of failure-free operation time of low-voltage electrical equipment, as well as the schemes of the in-house power supply.

Conclusions. The proposed methodology simplifies the forecasting of reliability parameters of the scheme of the internal shop power supply and the assessment of the technical condition of the most important and critical nodes. The modeled values of the load connection coefficients can be used in technical and economic calculations, namely for further

increase of the number of outgoing lines from the switchboard and distribution point or increase of the load on the line taking into account the permissible probability of failure-free operation of the scheme. The results of the study are recommended to evaluate technical performance and determination of the main reliability parameters of the operating systems of in-plant power supply.

References

1. Bagautdinov I.Z. *Raschet nadezhnosti* [Calculating Reliability]. *Teoriya i praktika sovremennoi nauki* [Theory and Practice of Modern Science], 2017, no. 4 (22), pp. 96–99.
2. Budnikova I.K., Priimak E.V. *Komp'yuternoe modelirovanie pokazatelei nadezhnosti sistem elektrosnabzheniya* [Computer modeling of reliability indicators of power supply systems]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2017, no. 5, pp. 76–79.
3. Byk F.L., Kakosha Yu.V., Myshkina L.S. *Faktor nadezhnosti pri proektirovanii raspredelitel'noi seti* [Factor of reliability in projecting a distribution network]. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki* [Izvestiya vuzov. Problems of power engineering], 2020, no. 6, pp. 43–54.
4. Zatsepina V.I., Astanin S.S. *Analiz nadezhnosti sistemy elektrosnabzheniya s uchetom otkazo-ustoychivosti releinoi zashchity* [Reliability analysis of the electrical supply system with regard to relay protection failure]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2020, no. 4, pp. 564–570.
5. Konyukhova E.A., Kireeva E.A. *Nadezhnost' elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy* [Reliability of an electrical supply of the industrial enterprises]. In: *Bibliotekha elektrotehnika. Vypusk 12(36)* [Biblioteka elektrotehnika. Iss. 12(36)]. Moscow, Energetik Publ., 2001, 93 p.
6. Kvatov E.Zh., Zhumashev N.G. *Printsipy matematicheskogo modelirovaniya i prognozirovaniya nadezhnosti elektricheskikh mashin* [Principles of mathematical modeling and reliability prediction of electrical machines]. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo»*, 2016, no. 1, pp. 158–160.
7. Popov A.V. *Issledovanie i sovershenstvovanie metodov rascheta nadezhnosti elementov elektrotekhnicheskikh kompleksov i sistem* [Research and improvement of the reliability calculation methods for the elements of the electrical engineering complexes and systems]. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*, 2015, no. 3–4, pp. 114–123.
8. Abdullazyanov E.Yu., Gracheva E.I., Petrov A.R. et al. *Rabotosposobnost' i nadezhnost' elektricheskikh kontaktov* [Workability and reliability of electrical contacts]. Kazan, Otechestvo Publ., 2024, 126 p.
9. Sadykov R.R. *Otsenka nadezhnosti nizkovol'tnykh tsekhovykh setei promyshlennogo elektrosnabzheniya* [Reliability assessment of the low-voltage workshop networks of the industrial power supply]. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*, 2017, no. 5–6, pp. 98–108.
10. Sekretarev Yu.A., Gorshunov A.A., Menyainkin D.A. *Modelirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya sistem elektrosnabzheniya monopotrebiteli s uchetom skhemnoi nadezhnosti* [Modeling of the technical condition of the equipment of the power supply systems of the mono-consumers taking into account the circuit reliability]. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedenii Chernozem'ya*, 2022, vol. 18, no. 3(69), pp. 3–14. DOI: 10.53015/18159958_2022_18_3_3.
11. Shpiganovich A.N., Shpiganovich A.A., Kvashnina G.V. *Obespechenie nadezhnosti funktsionirovaniya sistem elektrosnabzheniya* [Ensuring the reliability of power supply systems functioning]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskies nauki*, 2016., no. 12-3, pp. 93–102.
12. Gono R., Rusek S., Kratky M. et al. Reliability analysis of electric distribution system. In: 2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Rome, Italy, 2011, pp. 1–4. DOI: 10.1109/EEEIC.2011.5874842.
13. He B., Liang Y., Xie J. Research on Power Supply Reliability of Intelligent Distribution Network with Automatic Blocking Evaluation. In: 2024 IEEE 3rd International Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms (EEBDA), Changchun, China, 2024, pp. 207–210. DOI: 10.1109/EEBDA60612.2024.10485856.
14. Li Z., Liang D., Wang J. et al. A Data-driven Technique Based on Power System Reliability Assessment. In: 2023 3rd Power System and Green Energy Conference (PSGEC), Shanghai, China, 2023, pp. 576–581. DOI: 10.1109/PSGEC58411.2023.10255984.

15. Pan C. Reliability-Constrained Economic Dispatch with Analytical Formulation of Operational Risk Evaluation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2024, vol. 39, no. 2, pp. 4422–4436. DOI: 10.1109/TPWRS.2023.3317973.

16. Ruifeng Z., Shuqing H., Donglin D. et al. Low Voltage Power Supply Reliability Evaluation of Distribution Network Based on Data Quality Governance. In: 2020 4th International Conference on Power and Energy Engineering (ICPEE), Xiamen, China, 2020, pp. 75–78. DOI: 10.1109/ICPEE-51316.2020.9311017.

17. Tang X., Luo N., He X. et al. Energy Production Element Planning of Integrated Gas and Power systems Considering the Coordination between Economic and Reliability. In: 2021 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), Chongqing, China, 2021, pp. 1740–1745. DOI: 10.1109/ACPEE51499.2021.9436885.

18. Wang Y., Vittal V., Khorsand M. et al. Composite System Reliability Evaluation With Essential Reliability Services Assessment of Wind Power Integrated Power Systems. In: IEEE Open Access Journal of Power and Energy, 2020, vol. 7, pp. 403–413. DOI: 10.1109/OAJPE.2020.3029119.

RENATA M. PETROVA – Post-Graduate Student, Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Kazan State Power Engineering University, Russia, Kazan (1998renata@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2508-8771>).

ELENA I. GRACHEVA – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Kazan State Power Engineering University, Russia, Kazan (grachieva.i@bk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>).

Формат цитирования: Петрова Р.М., Грачева Е.И. Алгоритм расчета надежности схем внутрицехового электроснабжения с помощью коэффициентов присоединений // Вестник Чувашского университета. 2024. № 4. С. 117–127. DOI: 10.47026/1810-1909-2024-4-117-127.