



ВЛИЯНИЕ КОМПОНОВКИ ОБОРУДОВАНИЯ СХЕМ ВНУТРИЦЕХОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ИХ ПАРАМЕТРЫ НАДЕЖНОСТИ

Петрова* Р.М., Грачева Е.И.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

*1998renata@mail.ru <https://orcid.org/0009-0004-2508-8771>

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в оценке и уточнении параметров надежности систем внутрицехового электроснабжения предприятий с трансформаторными подстанциями напряжением 10/0,4 кВ. В предлагаемом исследовании анализируются показатели надежности для схем внутрицехового электроснабжения с различными видами резервирования: без резервирования; с резервированием на низком напряжении (установка автоматических выключателей), с резервированием на среднем напряжении (с установкой разъединителей и выключателя), без резервирования на низкой стороне; а также с двойным резервированием, предусматривающим дополнительно установку разъединителей и выключателя, а также автоматических выключателей. МЕТОДЫ. При проведении исследований используются основы теории надежности, теории вероятностей и статистической обработки данных. На основании результатов расчетов и полученной информации построены графические зависимости времени безотказной работы систем внутрицехового электроснабжения с двухтрансформаторными подстанциями в зависимости от номинальной мощности цеховых трансформаторов для четырех вариантов схем: без резервирования; с резервированием на НН; с резервированием на СН; с двойным резервированием – на СН и НН. Условием рациональности построения схемы электроснабжения принято наименьшее число трансформаторных подстанций, и, соответственно, распределительных трансформаторов, при принятом значении коэффициента загрузки, равным 0,8. При сравнении полученных результатов установлено, что наибольшее время наработки на отказ, равное 25,6 года, достигается при двойном резервировании, наименьшее – равное 5,4 года – при отсутствии резервирования. Исследуются параметры надежности системы, а именно параметр потока отказов и время наработки на отказ схемы при изменении числа двухтрансформаторных подстанций (N_{mn}) от 1 до 5, а также при различной мощности цеховых трансформаторов 10/0,4 кВ (от 25 до 2 500 кВА). РЕЗУЛЬТАТЫ. Полученные результаты показывают, что значение времени наработки на отказ $T_{нар.отк}$ для схемы без резервирования оказывается в 4,38 и в 4,29 раза меньше по сравнению со схемой с резервированием на СН и на НН соответственно, а также в 4,72 раза – меньше для схемы с двойным резервированием. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Проведенные исследования показывают, что рационально использовать минимальное число трансформаторных подстанций N_{mn} , равное 1 (при отсутствии резервирования) или 2, так как при $N_{mn} = 3-5$ время наработки на отказ $T_{нар.отк}$ минимальное и равно приблизительно 1,01 году при коэффициенте загрузки трансформаторов, равном 0,8. В результате исследований установлено, что максимальное время наработки на отказ, равное 6,4 года, получено для схемы при двойном резервировании, а минимальное, равное 1,01 году – при отсутствии резервных элементов.

Ключевые слова: внутрицеховое электроснабжение; трансформатор; подстанция; надежность; параметр потока отказов; резервирование.

Для цитирования: Петрова Р.М., Грачева Е.И. Влияние компоновки оборудования схем внутрицехового электроснабжения на их параметры надежности // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 2. С. 67-85. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-2-67-85.

THE INFLUENCE OF THE EQUIPMENT LAYOUT OF THE IN-SHOP POWER SUPPLY CIRCUITS ON THEIR RELIABILITY PARAMETERS

Petrova* R.M., Gracheva E.I.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

*1998renata@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-2508-8771>

Abstract: *RELEVANCE* of the research consists in estimation of the reliability parameters of in-house power supply systems for enterprises with transformer substations with a voltage of 10/0.4 kV. The proposed study analyzes reliability indicators for in-house power supply circuits with various types of redundancy: without redundancy; with low-voltage redundancy (installation of 0.4 kV circuit breakers), with medium-voltage redundancy (with installation of disconnectors and a circuit breaker), without redundancy on the low side; as well as with double redundancy, which additionally provides for the installation of disconnectors and a circuit breaker, as well as circuit breakers for 0.4 kV. **METHODS.** The research uses the fundamentals of reliability theory, probability theory, and statistical data processing. Based on the calculation results and the information obtained, graphical dependences of the uptime of in-shop power supply systems with dual transformer substations are constructed, depending on the nominal capacity of the shop transformers for four circuit options: without redundancy; with redundancy for LV; with redundancy for MV; with double redundancy – for MV and LV. The condition for the rationality of the construction of the power supply scheme is the smallest number of transformer substations, and, accordingly, distribution transformers, with the accepted value of the load factor equal to 0.8. When comparing the results obtained, it was found that the longest operating time for failure, equal to 25.6 years, is achieved with double redundancy, the smallest – equal to 5.4 years – in the absence of redundancy. The reliability parameters of the system are being investigated, namely, the failure rate parameter and the operating time for circuit failure when the number of two-transformer substations (N_{tp}) changes from 1 to 5, as well as with different capacities of 10/0.4 kV workshop transformers (from 25 to 2,500 kVA). **RESULTS.** The results obtained show that the value of the operating time for failure is T for the scheme without redundancy is 4.38 and 4.29 times lower compared to the scheme with redundancy for MV and LV, respectively, and 4.72 times lower for the scheme with double redundancy. **CONCLUSIONS.** The conducted studies show that it is rational to use the minimum number of transformer substations N_{tp} , equal to 1 (in the absence of redundancy) or 2, since with $N_{tp} = 3-5$ the operating time for failure is minimal and is approximately 1.01 years with a load factor of transformers equal to 0.8. As a result of the research, it was found that the maximum operating time A failure time of 6.4 years was obtained for the scheme with double redundancy, and a minimum time of 1.01 years was obtained in the absence of backup elements.

Keywords: *in-house power supply; transformer; substation; reliability; failure rate parameter; redundancy.*

For citation: Petrova R.M., Gracheva E.I. The influence of the equipment layout of the in-shop power supply circuits on their reliability parameters. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (2): 67-85. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-2-67-85.

Введение (Introduction)

Как известно, качественное электроснабжение потребителей электроэнергией обеспечивается при безотказной работе электрооборудования, а также внедрением способов повышения надежности элементов систем электроснабжения. Надежность работы оборудования определяется его способностью сохранять заданные технические параметры в течение установленного времени эксплуатации. Поддержание требуемого уровня надежности достигается за счет соблюдения условий хранения, эксплуатации, профилактического обслуживания и ремонта, а также внедрения современных технологий мониторинга состояния оборудования. Важным аспектом является системный подход при проектировании и эксплуатации систем электроснабжения, включающий анализ отказов электроустановок, оптимизацию режимов работы оборудования и своевременное проведение профилактических мероприятий для снижения вероятности отказов и повышения надежности системы электроснабжения.

Вопросы надежности систем электроснабжения промышленных предприятий, оценки характеристик электрооборудования и разработки соответствующих методик остаются актуальными направлениями исследований. Ниже представлен анализ некоторых научных работ отечественных и зарубежных ученых, проводящих исследования в данной области.

Абдуллазяновым Э.Ю., Грачевой Е.И. и др. [1] представлен анализ статистических данных основных показателей промышленного производства объектов средней мощности, что позволяет проводить оценку эффективности эксплуатации таких систем электроснабжения.

В исследовании Багаутдинова И.З. [2] показаны результаты расчетов параметров надежности вычислительных комплексов и систем.

Автором Гладких Т.Д. в [3] предложены модели надежности для систем электроснабжения объектов нефтедобычи. В работе выделено два типа электротехнических комплексов: электрическая сеть с потребителем, чувствительным к провалам напряжения и электрическая сеть с потребителем, имеющим технологическое резервирование.

Исследованию характеристик надежности низковольтных коммутационных аппаратов посвящена работа Грачевой Е.И., Наумова О.В., Шакуровой З.М. [4].

Авторы Зацепина В.И. и Астанин С.С. [5] представили анализ параметров надежности системы электроснабжения с учетом отказоустойчивости устройств релейной защиты.

В своей работе [6] Конюхова Е.А. исследует надежность систем промышленного электроснабжения для различных видов схем с двухтрансформаторными подстанциями. В другой своей работе [7] она предлагает новые подходы к оценке показателей надежности схем на этапе технико-экономического обоснования (ТЭО) вариантов электроснабжения объектов.

Исследователи Луковенко А.С., Зеньков И.В. [8] описывают показатели надежности системы электроснабжения с применением модели искусственной нейронной сети. Для предлагаемой разработки использовались алгоритм расчета показателей надежности систем электроснабжения, метод интенсивности отказов системы электроснабжения и модель прогнозирования.

Работа Петровой Р.М., Абдуллазянова Э.Ю., Грачевой Е.И. и др. [9] посвящена применению методов теории вероятностей для анализа и оценки надежности электрооборудования, используемого во внутрицеховых системах электроснабжения промышленных предприятий. В статье определены основные параметры надежности и проанализированы вероятностные характеристики надежности электрооборудования внутрицеховых систем электроснабжения.

Савина Н.В., Казакул А.А. [10] исследовали вопросы надежности функционирования распределительных сетей, нормально работающих в разомкнутом режиме. В работе предлагается внедрение системы адаптивного управления, т.е. предложен алгоритм поиска и принятия решений по повышению режимной надежности электрической сети с использованием коэффициентов чувствительности по напряжению в выделенных энергетических кластерах.

Садьковым Р.Р. [11] представлены результаты оценки показателей надежности низковольтных цеховых сетей промышленного электроснабжения в процессе эксплуатации.

Чжан Цзысюань, Курносовым Р.А., Юй Чжичжэн в [12] представлен анализ сети схемы электроснабжения шахты, системного оборудования и настроек защиты, надежность системы электроснабжения с учетом структуры сети. После проведенных технических мероприятий вероятность безотказной работы системы электроснабжения шахты увеличилась с 99,986% до 99,989%.

Шпиганович А.Н. и Зацепин Е.П. [13], а также Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А. и др. [14] исследовали отказоустойчивость систем электроснабжения промышленных предприятий.

Работа В. He, Y. Liang and J. Xie [15] посвящена исследованию и повышению надежности электроснабжения интеллектуальных распределительных сетей с использованием методики автоматического секционирования (автоматического блокирования распределительной сети) и оценки надежности блоков.

Ученые X. Che и др. [16] предлагают инновационный подход к управлению надежностью электроснабжения в современных энергосистемах с высокой долей ВИЭ (возобновляемые источники энергии), основанный на непрерывном сборе информации об аварийных отключениях электроэнергии и их анализе в реальном времени.

В статье Y. Li и др. [17] описывается комплексный процесс разработки мер, включая этапы проектирования, по обеспечению надежности и экспериментальную часть, в ходе

которой были произведены 72-часовые испытания по обеспечению надежности работы электроприемника.

R. Gono, S. Rusek, M. Kratky и Z. Leonowicz в [18] исследуют параметры надежности элементов распределительных сетей, а также возможности оптимизации технического обслуживания систем электроснабжения.

Y. Zhang и др. в работе [19] представили результаты исследований по локализации "слабых мест" (уязвимостей) и анализ взаимосвязей факторов, влияющих на надежность электроснабжения распределительной сети.

В работе Z. Ruifeng, H. Shuqing, D. Donglin, X. Xiaobing и L. Anjiang [20] предлагается метод оценки надежности электроснабжения потребителей в распределительных сетях низкого напряжения, основанный на управлении качеством исходных данных (сбор и обработка сетевых записей о бесперебойной работе).

Таким образом, проведенный обзор литературных источников показывает различные подходы при разработке методов анализа, расчета и оценки надежности оборудования электротехнических комплексов и систем электроснабжения.

Целью представленной работы является оценка параметров надежности схем электроснабжения с трансформаторными подстанциями с различными вариантами резервирования – на среднем и низком напряжении (далее СН и НН) – в отношении потребителей распределительного устройства на низком напряжении (РУНН). Объектом исследования является система внутрицехового электроснабжения на примере АО «Казанский завод медицинской аппаратуры».

Материалы и методы (Materials and methods)

Число распределительных трансформаторов ($N_{РТ}$)

$$N_{РТ} = \frac{P_{нг}}{\cos \phi_{нг} \cdot K_{зг} \cdot S_{ТР_{ном}}} = \frac{S_{норм.полн.нг}}{K_{зг} \cdot S_{ТР_{ном}}}, \quad (1)$$

где $P_{нг}$ – активная мощность нагрузки, Вт;
 $\cos \phi_{нг}$ – коэффициент мощности в тах активной нагрузки;
 $K_{зг}$ – коэффициент загрузки трансформатора;
 $S_{ТР_{ном}}$ – единичная номинальная мощность трансформатора, ВА;
 $S_{полн.нг}$ – расчетная полная мощность нагрузки, ВА, равная

$$S_{полн.нг} = \frac{P_{нг}}{\cos \phi_{нг}} \quad (2)$$

Расчетное число линий СН, присоединенных к одной секции шин источника питания ИП-СН

$$N_{Л.СН} = \frac{N_{РТ}}{n_{сш} \cdot N_{РТ.прис}} = \frac{S_{полн.нг}}{K_{зг} \cdot S_{ТР_{ном}} \cdot n_{сш} \cdot N_{РТ.прис}}, \quad (3)$$

где $n_{сш}$ – число секций шин ИП-СН;
 $N_{РТ.прис}$ – число распределительных трансформаторов (далее РТ), присоединенных к линии СН, $N_{РТ} = 1 \dots 5$.

Расчетное число присоединений на 1 секции ИП-СН

$$N_{прис.сш} = N_{ост} + N_{Л.СН} = N_{ост} + \frac{S_{полн.нг}}{K_{зг} \cdot S_{ТР_{ном}} \cdot n_{сш} \cdot N_{РТ.прис}}, \quad (4)$$

где $N_{ост}$ – остальные присоединения (трансформаторов, комплектных конденсаторных установок (ККУ) и прочего), $N_{ост} = 1 \dots 3$.

Расчетное число линий НН

$$N_{Л.НН} = \frac{P_{нг}}{\cos \phi_{нг} \cdot S_{ср.нг}}, \quad (5)$$

где $S_{ср.нг}$ – средняя мощность нагрузки по всем линиям НН.

Расчетное число присоединений на 1 секции ТП-НН

$$N_{прис.НН} = N_{ост} + N_{Л.НН} = N_{ост} + \frac{P_{нг}}{\cos \phi_{нг} \cdot S_{ср.нг}} \quad (6)$$

Число комплектов аппаратов на СН ($N_{компл}$) равно числу распределительных трансформаторов, присоединенных к линии СН: $N_{компл} = N_{РТ} = 1 \dots 5$.

Число разъединителей на вводах СН ($N_{разьедин}$) при петлевой схеме с резервированием линии: $N_{разьедин} = 2 \cdot N_{РТ}$. В петлевой схеме участки линий, связывающие между собой различных потребителей, образуют замкнутый контур (петлю). В нормальных режимах

петлевая схема всегда работает в разомкнутом состоянии.

Средняя длина участков кабельных линий (далее КЛ) СН между ТП, км рассчитывается как

$$L_{\text{учКЛ.СН}} = \gamma_{\text{ИП}} \cdot \frac{\sqrt{S_{\text{пр/пр}}}}{\sqrt{N_{\text{ТП}}}}, \quad (7)$$

где $\gamma_{\text{ИП}}$ – коэффициент, учитывающий расположение ИП и ТП, принимаем $\gamma_{\text{ИП}} = 1$;

$S_{\text{пр/пр}}$ – общая площадь производственного предприятия, км²;

$N_{\text{ТП}}$ – количество трансформаторных подстанций (ТП).

Средняя длина рабочих КЛ СН (от ИП до РТ), км принимается равной средней длине участков КЛ СН между ТП

$$L_{\text{рабКЛ.СН}} = L_{\text{учКЛ.СН}} \quad (8)$$

Средняя длина резервной линии СН (при петлевой схеме электроснабжения), км

$$L_{\text{резервСН}} = \gamma_{\text{ИП}} \cdot \frac{\sqrt{S_{\text{пр/пр}}}}{\sqrt{1 + N_{\text{РТ}}}} \quad (9)$$

Средняя длина радиальных питающих КЛ НН (от ТП до секций шин РУНН), км

$$L_{\text{КЛ.НН}} = \gamma_{\text{ТП}} \cdot \frac{\sqrt{S_{\text{пр/пр}}}}{\sqrt{N_{\text{ТП}}}}, \quad (10)$$

где $\gamma_{\text{ТП}}$ – коэффициент, учитывающий расположение ТП до секций шин РУНН, принимаем $\gamma_{\text{ТП}} = 1$;

$N_{\text{ТП}}$ – количество трансформаторных подстанций (ТП). При однотрансформаторных подстанциях

$$N_{\text{ТП}} = N_{\text{РТ}} \quad (11)$$

Преобразуем формулу (10) с учетом (1) и (11) для однотрансформаторных подстанций

$$\begin{aligned} L_{\text{КЛ.НН}} &= \gamma_{\text{ТП}} \cdot \frac{\sqrt{S_{\text{пр/пр}}}}{\sqrt{N_{\text{ТП}}}} = \gamma_{\text{ТП}} \cdot \frac{\sqrt{S_{\text{пр/пр}}}}{\sqrt{\frac{P_{\text{нз}}}{\cos \phi_{\text{нг}} \cdot K_{\text{зг}} \cdot S_{\text{ТРном}}}}} = \\ &= \gamma_{\text{ТП}} \cdot \frac{\sqrt{S_{\text{пр/пр}} \cdot \cos \phi_{\text{нг}} \cdot K_{\text{зг}} \cdot S_{\text{ТРном}}}}{\sqrt{P_{\text{нз}}}} \end{aligned} \quad (12)$$

Суммарный параметр потока отказов КЛ, $\Sigma \omega_{\text{КЛ}}$, откл/год

$$\begin{aligned} \Sigma \omega_{\text{КЛ}} &= \omega_{\text{КЛ.СН}} + \omega_{\text{КЛ.НН}} = \\ &= \Sigma \omega_{\text{прис.СН}} \cdot L_{\text{КЛ.СН}} + \Sigma \omega_{\text{прис.НН}} \cdot L_{\text{КЛ.НН}} = \\ &= \Sigma \omega_{\text{прис.СН}} \cdot (L_{\text{учКЛ.СН}} + L_{\text{рабКЛ.СН}} + L_{\text{резервСН}}) + \\ &\quad + \Sigma \omega_{\text{прис.НН}} \cdot L_{\text{КЛ.НН}} \end{aligned} \quad (13)$$

где $\Sigma \omega_{\text{прис.СН}}$ и $\Sigma \omega_{\text{прис.НН}}$ – суммарный параметр потока отказов присоединений КЛ СН и НН соответственно, откл/год.

Основные показатели надежности элементов схемы электроснабжения

Предположим, что характеристики надежности элементов системы электроснабжения подчиняются показательному закону распределения. Такой закон распределения параметров надежности считается обоснованным в случае, когда анализируемый интервал времени существенно меньше общего ресурса эксплуатации компонентов, но при этом период приработки завершен. В этом случае предполагается, что вероятность отказа в течение короткого временного промежутка остается постоянной и не зависит от времени эксплуатации, что соответствует свойствам показательного распределения. Такой подход позволяет упростить моделирование надежностных

характеристик и использовать аналитические методы для оценки вероятности отказов и планирования профилактических мероприятий.

1) Значение параметра потока отказов $\omega(t)$

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Q(t, t + \Delta t)}{\Delta t} \quad (14)$$

определяется вероятностью появления отказа $Q(t, \Delta t)$ в интервале времени $t, \Delta t$.

2) Значение вероятности безотказной (исправной) работы P

$$P = e^{-\omega}, \quad (15)$$

где ω – параметр потока отказов.

3) Значение вероятности появления отказа

$$Q = 1 - P = 1 - e^{-\omega} \quad (16)$$

4) Величина времени наработки на отказ

$$T_{\text{нар.отк.}} = \frac{1}{\omega} \quad (17)$$

Исследуем возможные виды электрических схем:

1. Схема без резервирования;
2. Схема с резервной линией НН (включающей автоматические выключатели АВ₃ и АВ₄);
3. Схема с резервной линией СН (установка разъединителей Р₃₁ и Р₃₂ и выключателя В₃), без резервирования на НН;
4. Схема с двойным резервированием: резервными линиями СН и НН (предусматривающим установку разъединителей Р₃₁ и Р₃₂, выключателя В₃ на СН и автоматических выключателей АВ₃ и АВ₄ на НН).

На рисунке 1 показан участок петлевой схемы электроснабжения. Петлевая схема во внутрицеховых системах электроснабжения имеет конфигурацию, в которой элементы распределительной сети соединены по замкнутому контуру, образуя одну или несколько контурных цепей. Такая топология обеспечивает наличие альтернативных путей передачи электроэнергии между источниками питания и потребителями, что способствует повышению надежности и устойчивости системы за счет возможности перенаправления токов при аварийных ситуациях, повреждениях или отключениях отдельных участков сети. Использование петлевых схем позволяет поддерживать режимы автоматического переключения и резервирования, а также оптимизировать эксплуатационные параметры внутрицеховой системы электроснабжения.

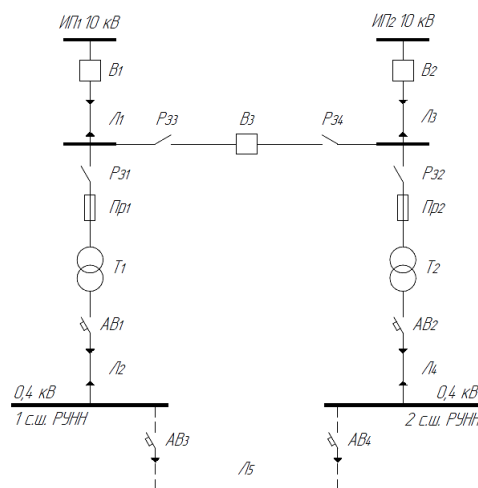


Рис. 1. Схема внутрицеховой системы электроснабжения с двойным резервированием *Fig. 1. Diagram of an in-house power supply system with double redundancy*

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

В таблице 1 представлены технические характеристики исследуемого оборудования - значения параметров потоков отказов элементов схемы, а также расчетное время наработки на отказ, полученные на основе анализа каталогов продукции компаний, специализирующихся на производстве электротехнического высоковольтного и низковольтного оборудования: ООО «Высоковольтный союз»¹, ООО ТД «Ункомтех» (кабельно-проводниковая продукция)², ООО «ЭЛТЕХКОМ» (высоковольтное оборудование)³, ЗАО «КЭАЗ» (электротехническая продукция)⁴ и ООО «Техэкспо»⁵, а также кабельно-проводниковой продукции компании «ЭКСПЕРТ-КАБЕЛЬ»⁶. Полученные данные позволяют выполнить оценку параметров надежности исследуемой системы, что способствует выявлению потенциальных слабых звеньев и разработке мероприятий по их устранению для повышения эксплуатационной надежности и устойчивости системы внутрицехового электроснабжения.

Таблица 1
Table 1Исходные технические данные исследуемого оборудования
Initial technical data of the investigated equipment

Элементы схемы, их обозначение	Марка, производитель ⁷	ω – параметр потока отказов, откл/год	$T_{\text{нар.отк.}}$ – время наработки на отказ, год
Вакуумные выключатели: В₁, В₂, В₃	ВРС-10, ООО "Высоковольтный союз", г. Москва, Екатеринбург	0,015	66,67
Кабельные линии 10 кВ: Л₁, Л₃	СКЛ-10кВ, сечение $S = 70 \text{ мм}^2$, длина 20 м, ООО ТД «Ункомтех», г. Иркутск	0,002	500
Резервная перемычка на 10 кВ	СКЛ-10кВ, сечение $S = 70 \text{ мм}^2$, длина 20 м, ООО ТД «Ункомтех»	0,002	500
Разъединители: Р₃₁, Р₃₂, Р₃₃, Р₃₄	РЛНД1-10-УХЛ1, АО «Курский электроаппаратный завод» (КЭАЗ), г. Курск	0,038	26,32
Предохранители: Пр₁, Пр₂	ПКТ-101-У1, «КЭАЗ»	0,05	20
Силовые трансформаторы:	ТМ-1600/10/0,4, ООО «ЭЛТЕХКОМ»,	0,015	66,67

¹ Каталог продукции электротехнического высоковольтного оборудования и аппаратуры ООО «Высоковольтный Союз»: сайт. – URL: <https://www.vsoyuz.com/> (дата обращения: 26.07.2025)

² Каталог кабельно-проводниковой продукции ООО ТД «Ункомтех»: сайт. – URL: <https://www.uncomtech.ru/> (дата обращения: 26.07.2025)

³ Каталог продукции компании «ЭЛТЕХКОМ»: сайт. – URL: <https://eltexkom.com/silovye-transformatory/> (дата обращения: 26.07.2025)

⁴ Каталог электротехнической продукции КЭАЗ: сайт. – URL: <https://keaz.ru/catalog> (дата обращения: 26.07.2025)

⁵ Каталог производителя оборудования ООО «Техэкспо»: сайт. – URL: <https://tech-expo.ru/> (дата обращения: 26.07.2025)

⁶ Каталог кабельно-проводниковой продукции «ЭКСПЕРТ-КАБЕЛЬ»: сайт. – URL: <https://expert-cable.ru/catalog/> (дата обращения: 26.07.2025)

⁷ Каталог продукции электротехнического высоковольтного оборудования и аппаратуры ООО «Высоковольтный Союз»: сайт. – URL: <https://www.vsoyuz.com/> (дата обращения: 26.07.2025)

Каталог кабельно-проводниковой продукции ООО ТД «Ункомтех»: сайт. – URL: <https://www.uncomtech.ru/> (дата обращения: 26.07.2025)

Каталог продукции компании «ЭЛТЕХКОМ»: сайт. – URL: <https://eltexkom.com/silovye-transformatory/> (дата обращения: 26.07.2025)

Каталог электротехнической продукции КЭАЗ: сайт. – URL: <https://keaz.ru/catalog> (дата обращения: 26.07.2025)

Каталог производителя оборудования ООО «Техэкспо»: сайт. – URL: <https://tech-expo.ru/> (дата обращения: 26.07.2025)

Каталог кабельно-проводниковой продукции «ЭКСПЕРТ-КАБЕЛЬ»: сайт. – URL: <https://expert-cable.ru/catalog/> (дата обращения: 26.07.2025)

Элементы схемы, их обозначение	Марка, производитель ⁷	ω – параметр потока отказов, откл/год	$T_{нар.отк.}$ – время наработки на отказ, год
T_1, T_2	г. Нижний Новгород		
Автоматические выключатели: AB_1, AB_2	ВА51-39, «КЭАЗ»	0,051	19,61
Кабельные линии 0,4 кВ: $Л_2, Л_4$	АВВГ-0,4 кВ, сечение $S = 16 \text{ мм}^2$, длина 5 м, «ЭКСПЕРТ-КАБЕЛЬ», г. Орел, Москва, Екатеринбург	0,013	76,92
Резервная перемычка на 0,4 кВ: $Л_5$	АВВГ-0,4 кВ, сечение $S = 4 \text{ мм}^2$, длина 2 м, «ЭКСПЕРТ-КАБЕЛЬ»	0,0052	192,31
AB_3, AB_4	ВА51-35, «КЭАЗ»	0,051	19,61
Шкаф РУНН 0,4 кВ	КТП-1600 кВА, ООО «Техэкспо», г. Казань	0,001	1000

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Обсуждение (Discussions)

1) Логическая схема надежности для участка сети от ИП₁ до 1 секции шин (далее с.ш.) РУНН, включающего следующие элементы: В₁, Л₁, Р_{з1}, Пр₁, Т₁, АВ₁ и Л₂ (по рис. 1) без резервирования

На рисунке 2 показана структурная схема надежности для участка электрической схемы сети без резервирования. При такой конфигурации отказ любого компонента приводит к полной утрате работоспособности всей системы. Данная схема называется последовательной или системой с основным последовательным соединением элементов, поскольку её безотказная эксплуатация возможна только при исправности каждого элемента (№ 1-7). Эффективность функционирования данной системы определяется исходным состоянием компонентов и порядком возникновения отказов (узлов), что существенно влияет на вероятность сохранения работоспособности при возникновении отказов отдельных элементов.

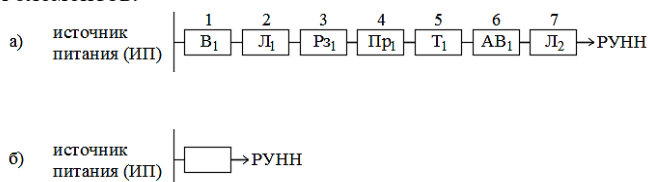


Рис. 2. Логическая схема надежности участка электрической схемы сети без резервирования (а) и ее преобразование (б)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Параметр потока отказов для цепи ИП-РУНН (рис. 2б) для участка схемы без резервирования ($\omega_{безРез.}$)

$$\omega_{безРез.} = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 + \omega_5 + \omega_6 + \omega_7 = \omega_{В1} + \omega_{Л1} + \omega_{Рз1} + \omega_{Пр1} + \omega_{Т1} + \omega_{АВ1} + \omega_{Л2},$$

- где $\omega_В$ – значение параметра потока отказов выключателя 10 кВ;
- $\omega_{Л1}$ – значение параметра потока отказов кабельной линии 10 кВ;
- $\omega_{Рз1}$ – значение параметра потока отказов разъединителя 10 кВ;
- $\omega_{Пр1}$ – значение параметра потока отказов предохранителя 10 кВ;
- $\omega_Т$ – значение параметра потока отказов трансформатора 10/0,4 кВ;
- $\omega_{АВ1}$ – значение параметра потока отказов автоматического выключателя;
- $\omega_{Л2}$ – значение параметра потока отказов кабельной линии 0,4 кВ.

- Значение параметра потока отказов КЛ зависит от длины и рассчитывается
- для $\omega_{Л1}$ (СКЛ-10 кВ) с учетом данных на 1 км: $\omega_{Л1} = 0,01 \cdot (200 \text{ м} / 1000 \text{ м}) = 0,002$ откл/год;
- для $\omega_{Л2}$ (АВВГ-0,4 кВ) на 10 м: $\omega_{Л2} = 0,026 \cdot (5 \text{ м} / 10 \text{ м}) = 0,013$ откл/год.

$$\omega_{\text{безРез.}} = 0,015 + 0,002 + 0,038 + 0,05 + 0,015 + 0,051 + 0,013 = 0,184 \text{ откл/год};$$

$$T_{\text{нар.отк.}} = \frac{1}{\omega} = \frac{1}{0,184} = 5,4 \text{ лет.}$$

2) Логическая схема участка сети с резервной линией НН (рис. 1), включающего следующие элементы схемы: от ИП₁ до 1 с.ш. РУНН: В₁, Л₁, Рз₁, Пр₁, Т₁, АВ₁ и Л₂, от ИП₂ до 2 с.ш. РУНН аналогично, а также АВ₃, Л₅ и АВ₄ (по рис. 1)

Резервирование является одним из методов повышения надежности и отказоустойчивости систем электроснабжения, основанным на использовании запасных элементов или устройств, предназначенных для замещения отказавших компонентов в процессе эксплуатации. Этот метод позволяет обеспечить непрерывность функционирования системы за счет своевременного переключения на резервные элементы при возникновении отказов в основных элементах. В зависимости от уровня и объема замещения различают следующие виды резервирования: поэлементное, при котором каждый основной элемент имеет свой резервный аналог; групповое, предполагающее резервирование группы элементов; и общее резервирование, при котором один или несколько запасных элементов предназначены для замещения нескольких основных устройств.

Количество резервных элементов, предназначенных для замены конкретной основной электроустановки, определяет кратность резервирования и влияет на уровень надежности системы. В условиях общего резервирования с режимом облегченного резерва запасные элементы в период ожидания выполнения замены несут частичную нагрузку, что позволяет снизить их износ и вероятность отказа по сравнению с основной нагрузкой. Такой режим обеспечивает более длительный срок службы резервных устройств и повышает вероятность их успешного функционирования при необходимости переключения. В данном случае вероятность отказа запасных элементов в период ожидания существенно ниже, чем основных компонентов, что способствует повышению общей отказоустойчивости системы и снижению риска аварийных ситуаций вследствие отказа основных элементов.

Для электрической схемы 1 с.ш. РУНН с установленной резервной перемычкой на НН логическая схема надежности имеет две последовательные рабочие цепи, соединенные параллельно (рис. 3).

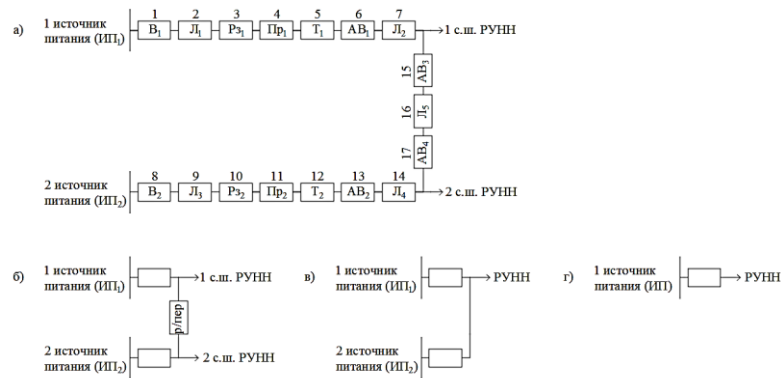


Рис. 3. Логическая схема надежности для системы внутрицехового электроснабжения с резервированием на НН (а), этапы преобразования: первый (б), второй (в) и третий (г)

Fig. 3. Logical reliability scheme for an in-shop power supply system with redundancy for LV (a), conversion stages: first (б), second (в) and third (г)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Первый этап включает в себя преобразование последовательных ветвей (рис. 3б, в).

Параметр потока отказов цепи ИП₁-р/пер ($\omega_{\text{ИП1-р/пер}}$)

$$\begin{aligned} \omega_{\text{ИП1-р/пер}} &= \omega_1 + \dots + \omega_7 = \\ &= \omega_{B1} + \omega_{L1} + \omega_{Pz1} + \omega_{Pr1} + \omega_{T1} + \omega_{AB1} + \omega_{L2} = 0,184 \end{aligned}$$

Параметр потока отказов цепи ИП₂-р/пер ($\omega_{\text{ИП2-р/пер}}$)

$$\omega_{\text{ИП2-р/пер}} = \omega_8 + \dots + \omega_{14} + \omega_{\text{р/пер}}$$

В понятие «резервная перемычка» (р/пер) входит 2 автоматических выключателя АВ₃

и АВ₄ и КЛ 0,4 кВ. Параметр потока отказов р/пер ($\omega_{p/пер}$):

$$\omega_{p/пер} = \omega_{15} + \omega_{16} + \omega_{17} = \omega_{AB3} + \omega_{Л5} + \omega_{AB4} = 2 \cdot 0,051 + 0,0052 = 0,107$$

$$\omega_{ИП2-p/пер} = 0,291$$

На **втором этапе** преобразования (рис. 3в, г) требуется рассчитать вероятности появления отказа параллельных ветвей. Вероятности безотказной работы цепей

$$P_{ИП1-p/пер} = e^{-(\omega_{ИП1-p/пер})} = e^{-0,184} = 0,832;$$

$$P_{ИП2-p/пер} = e^{-(\omega_{ИП2-p/пер})} = e^{-0,291} = 0,748.$$

Вероятности появления отказа цепей

$$Q_{ИП1-p/пер} = 1 - e^{-0,184} = 0,168;$$

$$Q_{ИП2-p/пер} = 1 - e^{-0,291} = 0,252.$$

Вероятность появления отказа схемы (для системы из двух параллельно соединенных элементов)

$$Q_{схемы} = Q_{ИП1-p/пер} \cdot Q_{ИП2-p/пер} = 0,168 \cdot 0,252 = 0,042$$

Вероятность безотказной работы схемы

$$P_{схемы} = 1 - Q_{схемы} = 1 - 0,042 = 0,958.$$

Зная $P_{схемы}$, можно определить параметр потока отказов для системы из двух, параллельно соединенных элементов, а также время наработки на отказ

$$\omega_{схемы} = -\ln(P_{схемы}) = -\ln(0,958) = 0,043 \text{ откл/год};$$

$$T_{нар.отк.} = \frac{1}{0,043} = 23,3 \text{ года.}$$

3) Логическая схема для участка электрической схемы с резервной линией СН, без резервирования на НН

Для электрической схемы с резервированием линии СН, включающей следующие элементы – от ИП₁ до 1 с.ш. РУНН: В₁, Л₁, Рз₁, Пр₁, Т₁, АВ₁ и Л₂, от ИП₂ до 2 с.ш. РУНН аналогично, а также Рз₃, В₃ и Рз₄ (рис.1), логическая схема надежности имеет две последовательные рабочие цепи, соединенные параллельно элементами Рз₄-В₃-Рз₃ (рис. 4).

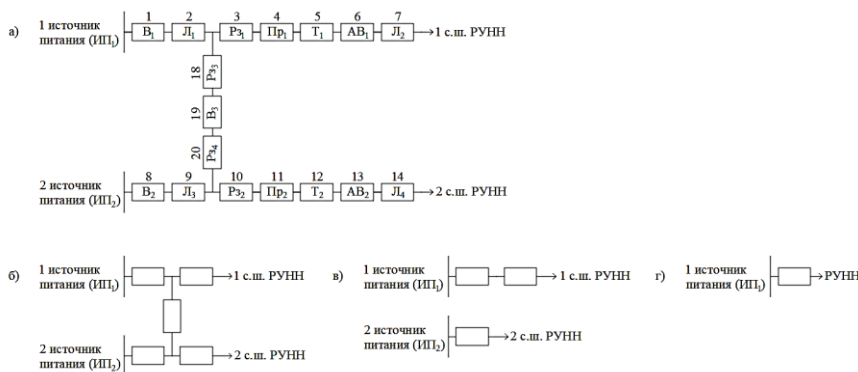


Рис. 4. Логическая схема надежности для системы внутрицехового электроснабжения с резервированием линии СН, без резервирования на НН (а), этапы преобразования: первый (б), второй (в) и третий (г)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Логическая схема надежности подобна схеме на рис. 3, этапы преобразования также аналогичные.

Первый этап включает в себя преобразование последовательных ветвей.

Параметр потока отказов цепи ИП₁-Л₁ ($\omega_{ИП1-резерв}$)

$$\omega_{ИП1-резерв} = \omega_1 + \omega_2 + \omega_{резерв}$$

В понятие «резервирование линии СН» (резерв) входит 2 разъединителя Р₃₃ и Р₃₄ и выключатель В₃. Параметр потока отказов $\omega_{резерв}$

$$\omega_{резерв} = \omega_{18} + \omega_{19} + \omega_{20} = \omega_{P_{33}} + \omega_{B_3} + \omega_{P_{34}} = 2 \cdot 0,038 + 0,015 = 0,091;$$

$$\omega_{ИП_1-резерв} = 0,015 + 0,002 + 0,091 = 0,108$$

Параметр потока отказов цепи ИП₂-Л₃ ($\omega_{ИП_2-Л_3}$)

$$\omega_{ИП_2-Л_3} = \omega_8 + \omega_9 = \omega_{B_2} + \omega_{Л_3} = 0,015 + 0,002 = 0,017$$

Параметр потока отказов цепи Р₃₁ – 1 с.ш. РУНН ($\omega_{P_{31}-1 \text{ с.ш. РУНН}}$)

$$\omega_{P_{31}-1 \text{ с.ш. РУНН}} = \omega_3 + \dots + \omega_7 = \omega_{P_{31}} + \omega_{Pr_1} + \omega_{T_1} + \omega_{AB_1} + \omega_{L_2} = \\ = 0,038 + 0,05 + 0,015 + 0,051 + 0,013 = 0,167$$

Параметр потока отказов цепи Р₃₂ – 2 с.ш. РУНН ($\omega_{P_{32}-2 \text{ с.ш. РУНН}}$)

$$\omega_{P_{32}-2 \text{ с.ш. РУНН}} = \omega_{10} + \dots + \omega_{14} = 0,167$$

Второй этап преобразования.

Параметр потока отказов цепи ИП₁ – 1 с.ш. РУНН ($\omega_{ИП_1-1 \text{ с.ш. РУНН}}$)

$$\omega_{ИП_1-1 \text{ с.ш. РУНН}} = \omega_{ИП_1-резерв} + \omega_{P_{31}-1 \text{ с.ш. РУНН}} = \\ = 0,108 + 0,167 = 0,275;$$

Параметр потока отказов цепи ИП₂ – 2 с.ш. РУНН ($\omega_{ИП_2-2 \text{ с.ш. РУНН}}$):

$$\omega_{ИП_2-2 \text{ с.ш. РУНН}} = \omega_{ИП_2-Л_3} + \omega_{P_{32}-2 \text{ с.ш. РУНН}} = \\ = 0,017 + 0,167 = 0,184.$$

Для третьего этапа преобразования требуется рассчитать вероятности появления отказа последовательных ветвей. Вероятности безотказной работы цепей

$$P_{ИП_1-1 \text{ с.ш. РУНН}} = e^{-0,275} = 0,759;$$

$$P_{ИП_2-2 \text{ с.ш. РУНН}} = e^{-0,184} = 0,832.$$

Вероятности появления отказа цепей

$$Q_{ИП_1-1 \text{ с.ш. РУНН}} = 1 - e^{-0,275} = 0,241;$$

$$Q_{ИП_2-2 \text{ с.ш. РУНН}} = 1 - e^{-0,184} = 0,168.$$

Третий этап включает в себя преобразование параллельных ветвей ИП₁ – 1 с.ш. РУНН и ИП₂ – 2 с.ш. РУНН.

Вероятность появления отказа схемы (для системы из двух параллельно соединенных элементов)

$$Q_{схемы} = Q_{ИП_1-1 \text{ с.ш. РУНН}} \cdot Q_{ИП_2-2 \text{ с.ш. РУНН}} = \\ = 0,241 \cdot 0,168 = 0,041$$

Вероятность безотказной работы схемы

$$P_{схемы} = 1 - Q_{схемы} = 1 - 0,041 = 0,959$$

Зная $P_{схемы}$, можно определить параметр потока отказов для системы из двух, параллельно соединенных элементов

$$\omega_{схемы} = -\ln(P_{схемы}) = -\ln(0,959) = 0,042 \text{ откл/год};$$

$$T_{нар.отк.} = \frac{1}{0,042} = 23,8 \text{ лет.}$$

4) Логическая схема с двойным резервированием (с резервированием всей цепи СН-НН)

На рисунке 5 приведена логическая схема надежности для электрической схемы с двойным резервированием.

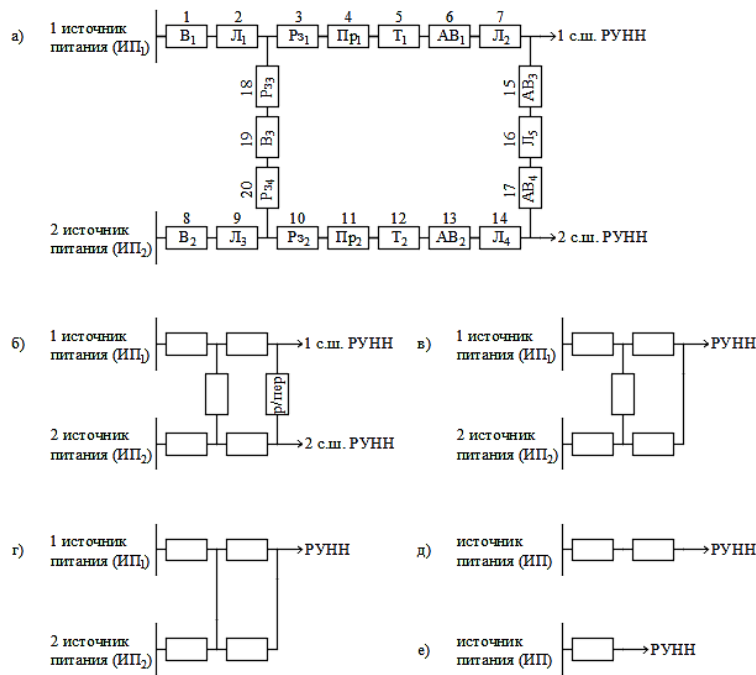


Рис. 5. Логическая схема надежности для системы внутрицехового электроснабжения с двойным резервированием (а), этапы преобразования: первый (б), второй (в), третий (г), четвертый (д) и пятый (е)

Fig. 5. Reliability logic diagram for an in-house power supply system with double redundancy (a), conversion stages: first (b), second (c), third (d) and fifth (e)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Первый этап преобразования заключается в упрощении всех последовательных ветвей исходной схемы (рис. 5а).

$$\begin{aligned} \omega_{ИП1-Л1} &= \omega_1 + \omega_2 \\ \omega_{ИП2-Л3} &= \omega_8 + \omega_9 \\ \omega_{резерв} &= \omega_{18} + \omega_{19} + \omega_{20} \\ \omega_{Pz1-1с.ш.РУНН} &= \omega_3 + \omega_4 + \omega_5 + \omega_6 + \omega_7 \\ \omega_{Pz2-2с.ш.РУНН} &= \omega_{10} + \dots + \omega_{14} + \omega_{p/per} \end{aligned}$$

где

$$\omega_{p/per} = \omega_{15} + \omega_{16} + \omega_{17}$$

Далее рассчитывается вероятность безотказной работы Р и вероятность появления отказа Q для последовательных цепей

$$\begin{aligned} R_{ИП1-Л1} &= e^{-\omega_{ИП1-Л1}} \\ R_{ИП2-Л3} &= e^{-\omega_{ИП2-Л3}} \end{aligned}$$

Тогда, вероятность отказа

$$\begin{aligned} Q_{ИП1-Л1} &= 1 - e^{-\omega_{ИП1-Л1}} \\ Q_{ИП2-Л3} &= 1 - e^{-\omega_{ИП2-Л3}} \end{aligned}$$

Вероятность одновременного отказа параллельных элементов «ИП₁-Л₁» и «ИП₂-Л₃» (рис. 5г), обозначим Q*, определяется как произведение вероятностей отказа этих элементов

$$Q^* = Q_{ИП1-Л1} \cdot Q_{ИП2-Л3}$$

Вероятность безотказной работы параллельных элементов «ИП₁-Л₁» и «ИП₂-Л₃»

$$P^* = 1 - Q_{ИП1-Л1} \cdot Q_{ИП2-Л3}$$

Тогда параметр потока отказов

$$\omega^* = -\ln(P^*)$$

Аналогичный расчет производится для параллельной ветви «Рз₁ – 1 с.ш. РУНН» и «Рз₂ – 2 с.ш. РУНН» (рис. 5г).

После преобразования последовательных элементов схемы (рис. 5д, 5е) параметр потока отказов $\omega_{\text{схемы}}$

$$\omega_{\text{схемы}} = 0,039 \text{ откл/год.}$$

Время наработки на отказ $T_{\text{нар.отк.}}$

$$T_{\text{нар.отк.}} = \frac{1}{0,039} = 25,6 \text{ года.}$$

Обсуждение результатов (Results)

В таблице 2 приведены результаты расчетов для логических схем (для рис. 2, 3, 4 и 5).

Таблица 2
Table 2

Результаты расчета вариантов схем электроснабжения
Results of calculation of variants of power supply schemes

Виды схем участков внутрицеховых систем электроснабжения с учетом различных видов резервирования	Результирующее значение параметров потоков отказов схем $\omega_{\text{схемы}}$, откл/год	Расчетное значение времени наработки на отказ схемы $T_{\text{нар.отк.}}$, год
1. Схема без резервирования;	0,184	5,4
2. Схема с резервной линией НН (включающей автоматические выключатели АВ ₃ и АВ ₄);	0,043	23,3
3. Схема с резервной линией СН (установка разъединителей Рз ₁ и Рз ₂ и выключателя В ₃), без резервирования на НН;	0,042	23,8
4. Схема с двойным резервированием: резервными линиями СН и НН (предусматривающим установку разъединителей Рз ₁ и Рз ₂ , выключателя В ₃ и автоматических выключателей АВ ₃ и АВ ₄).	0,039	25,6

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Данные таблицы 2 показывают, что параметр потока отказов без резервирования имеет наибольшее значение, $\omega_{\text{схемы}} = 0,184$ и уменьшается при резервировании (при включении секционного выключателя) – $\omega_{\text{схемы}} = 0,043$, а далее при двойном резервировании – $\omega_{\text{схемы}} = 0,039$, что доказывает высокую надежность схемы с двойным резервированием.

Величина времени наработки на отказ $T_{\text{нар.отк.}}$ обратно пропорциональна параметру потока отказов схемы $\omega_{\text{схемы}}$. Время наработки на отказ имеет максимальное значение при двойном резервировании схемы, $T_{\text{нар.отк.}} = 25,6$ и минимальное – схемы без резервирования $T_{\text{нар.отк.}} = 5,4$. Данные расчетов показывают, что надежность схемы без резервирования в 4,38 и в 4,29 раза ниже схемы с резервированием на СН и на НН соответственно, а также в 4,72 раза ниже схемы с двойным резервированием, что подтверждает эффективность использования резервных элементов для повышения надежности системы.

Далее исследуем параметры надежности системы при изменении числа двухтрансформаторных подстанций ($N_{\text{ТП}}$) от 1 до 5, а также при различной мощности цеховых трансформаторов 10/0,4 кВ (от 25 до 2 500 кВА).

Исходные данные для расчетов:

- расчетная активная мощность нагрузки (двигатели Д) на НН $P_{\text{нр}} = 1,2 \cdot 10^6$ Вт;
- коэффициент мощности в тах активной нагрузки НН $\cos\varphi_{\text{нр}} = 0,92$;
- коэффициент загрузки $k_{\text{зг}} = 0,8$;
- общая площадь предприятия $S_{\text{нр/нр}} = 0,75 \text{ км}^2$.

Приведем пример расчета параметров для двухтрансформаторной подстанции $N_{ТН} = 1$, $S_{ТНном} = 1\ 000$ кВА.

Определим расчетную полную мощность нагрузки $S_{полн.нг}$

$$S_{полн.нг} = \frac{P_{нг}}{\cos \varphi_{нг}} = \frac{1,2 \cdot 10^6}{0,92} = 1,31 \cdot 10^6 \text{ ВА.}$$

Определим число КЛ СН, присоединенных к 1-ой секции шин ИП₁-СН

$$N_{прис.СН} = N_{ост} + \frac{S_{полн.нг}}{K_{зз} \cdot S_{ТНном} \cdot n_{сш} \cdot N_{РТ.прис}} =$$

$$= 2 + \frac{1,31 \cdot 10^6}{2 \cdot 1 \cdot 0,8 \cdot 1000 \cdot 10^3} = 2,828$$

Принимаем расчетное число присоединений на секции ИП₁-СН $N_{прис.СН} = 3$.

Определим величину суммарного параметра потока отказов присоединений КЛ СН

$$\sum \omega_{КЛ.СН} = N_{прис.СН} \cdot \omega_{Л.СН} = 3 \cdot 0,002 = 0,006 \text{ откл/год.}$$

Определим среднюю длину участков КЛ СН между рядом стоящими ТП

$$L_{уч.КЛ.СН} = \gamma_{ИП} \cdot \frac{\sqrt{S_{np}/np}}{\sqrt{N_{ТП}}} = 1 \cdot \frac{\sqrt{0,75}}{\sqrt{1}} = 0,866 \text{ км.}$$

Определим среднюю длину рабочих линий СН (от ИП₁ до РТ)

$$L_{раб.КЛ.СН} = L_{уч.КЛ.СН} = 0,866 \text{ км.}$$

Определим среднюю длину резервной линии СН

$$L_{резерв.СН} = \gamma_{ИП} \cdot \frac{\sqrt{S_{np}/np}}{\sqrt{1+N_{РТ}}} = 1 \cdot \frac{\sqrt{0,75}}{\sqrt{1+1}} = 0,612 \text{ км.}$$

Определим расчетное число присоединений на 1-ой с.ш. ТП-НН

$$N_{прис.НН} = N_{ост} + N_{Л.НН} = N_{ост} + \frac{P_{нг}}{\cos \varphi_{нг} \cdot S_{ср.нг}} =$$

$$= 2 + \frac{1,2 \cdot 10^6}{0,92 \cdot 1000 \cdot 10^3} = 3,3$$

Принимаем расчетное число присоединений на 1-ой с.ш. ТП-НН $N_{прис.НН} = 4$.

Определим величину суммарного параметра потока отказов присоединений КЛ НН

$$\sum \omega_{КЛ.НН} = N_{прис.НН} \cdot \omega_{Л.НН} = 4 \cdot 0,013 = 0,052 \text{ откл/год.}$$

Определим величину средней длины радиальных питающих КЛ НН (от ТП до 1 с.ш. РУНН), км

$$L_{КЛ.НН} = \gamma_{ТП} \cdot \frac{\sqrt{S_{np}/np}}{\sqrt{N_{ТП}}} = 1 \cdot \frac{\sqrt{0,75}}{\sqrt{1}} = 0,866 \text{ км.}$$

Определим величину суммарного параметра потока отказов КЛ $\sum \omega_{кл}$

$$\sum \omega_{кл} = \omega_{кл.СН} + \omega_{кл.НН} =$$

$$= \sum \omega_{прис.СН} \cdot L_{КЛ.СН} + \sum \omega_{прис.НН} \cdot L_{КЛ.НН} =$$

$$= \sum \omega_{прис.СН} \cdot (L_{уч.КЛ.СН} + L_{раб.КЛ.СН} + L_{резерв.СН}) +$$

$$+ \sum \omega_{прис.НН} \cdot L_{КЛ.НН} =$$

$$= 0,006 \cdot (0,866 + 0,866 + 0,612) + 0,052 \cdot 0,866 = 0,059 \text{ откл/год.}$$

Определим $\omega_{схемы}$ с учетом установленного оборудования:

- схема без резервирования: $\omega_{схемы} = 0,278$; $T_{нар.отк.} = 3,595$;
- схема с резервной линией НН (включающей автоматические выключатели АВ₃ и АВ₄): $\omega_{схемы} = 0,137$; $T_{нар.отк.} = 7,292$;
- схема с резервной линией СН (установка разъединителей Р_{з1} и Р_{з2} и выключателя В₃): $\omega_{схемы} = 0,136$; $T_{нар.отк.} = 7,346$;
- схема с двойным резервированием: резервными линиями СН и НН (предусматривающим установку разъединителей Р_{з1} и Р_{з2}, выключателя В₃ и автоматических выключателей АВ₃ и АВ₄): $\omega_{схемы} = 0,133$; $T_{нар.отк.} = 7,511$.

На рисунке 6 приведены графические зависимости времени наработки на отказ $T_{нар.отк.}$ схем с числом двухтрансформаторных подстанций $N_{ТП}$ от 1 до 5 и различной номинальной мощностью цеховых трансформаторов 10/0,4 кВ (от 25 до 2 500 кВА).

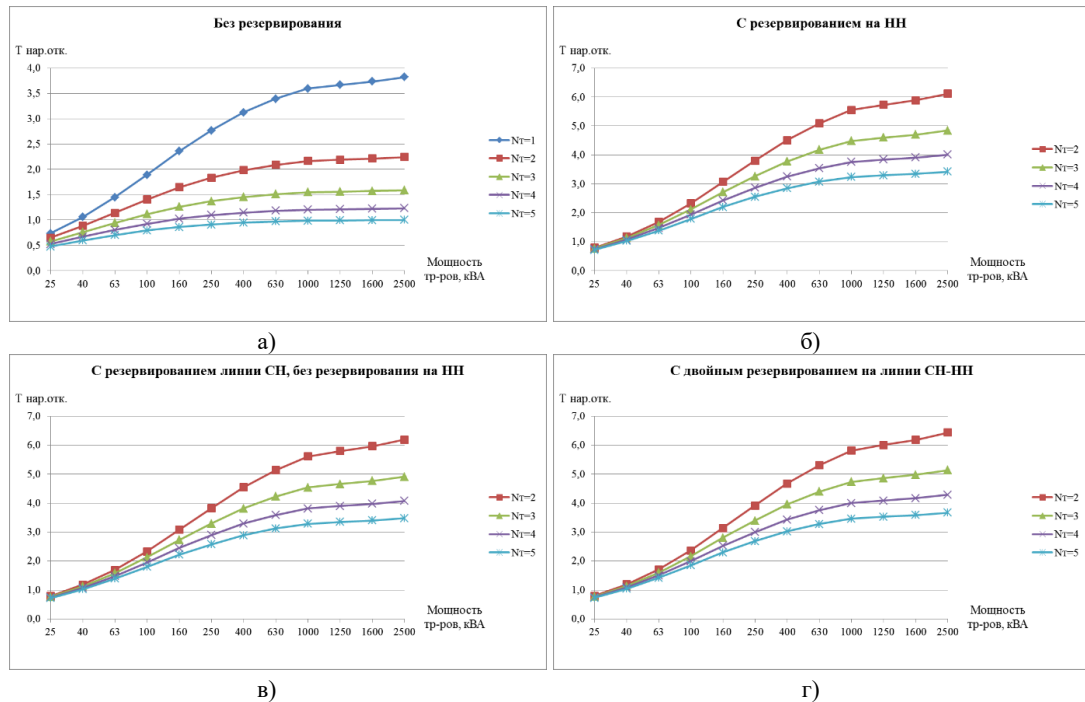


Рис. 6. Графические зависимости времени наработки на отказ для схем с различными видами резервирования от номинальной мощности цеховых трансформаторов от 25 до 2 500 кВА, при различном числе ТП:
 а) без резервирования, $N_{ТП}$ = от 1 до 5;
 б) с резервированием на НН, $N_{ТП}$ = от 2 до 5;
 в) с резервированием на СН, $N_{ТП}$ = от 2 до 5;
 г) с двойным резервированием, $N_{ТП}$ = от 2 до 5

Fig. 6. Graphical dependences of MTBF for circuits with various types of redundancy on the rated power of shop transformers from 25 to 2 500 kVA, at different number of transformer substations:
 а) without redundancy, N_{tp} = from 1 to 5;
 б) with redundancy on LV, N_{tp} = from 2 to 5;
 в) with redundancy on MV, N_{tp} = from 2 to 5;
 з) with double redundancy, N_{tp} = 2 to 5

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Графические зависимости (рис. ба-г) показывают, что при увеличении номинальной мощности трансформаторов $S_{тр.ном}$ от 25 до 2 500 кВА время наработки на отказ $T_{нар.отк.}$ увеличивается, это объясняется следующими условиями:

- 1) Уменьшается расчетное число КЛ СН, присоединенных к 1-ой с.ш. ИП₁-СН и ИП₂-СН $N_{кл.сн}$ по формуле (3);
- 2) Уменьшается расчетное число присоединений на 1-ой с.ш. ИП₁-СН и ИП₂-СН $N_{прис.сн}$ по формуле (4);
- 3) Уменьшается суммарный параметр потока отказов присоединений КЛ СН $\Sigma\omega_{прис.сн}$;
- 4) Уменьшается расчетное число КЛ НН $N_{кл.нн}$ по формуле (5);
- 5) Уменьшается расчетное число присоединений на 1-ой с.ш. и 2-ой с.ш. ТП-НН $N_{прис.нн}$ по формуле (6);
- 6) Уменьшается суммарный параметр потока отказов присоединений КЛ НН $\Sigma\omega_{прис.нн}$;
- 7) Уменьшается суммарный параметр потока отказов КЛ $\Sigma\omega_{кл}$ по формуле (13);
- 8) Уменьшается результирующий параметр потока отказов схемы $\omega_{схемы}$;
- 9) Увеличивается время наработки на отказ схемы $T_{нар.отк.}$ по формуле (17).

Графики рисунке 6 (а-г) показывают, что время наработки на отказ ($T_{нар.отк.}$) имеет максимальное значение, равное 6,4 года (рис. бг, линия $N_{ТП} = 2$), при значении номинальной мощности трансформаторов, равной 2 500 кВА в схеме с двойным резервированием на линии СН-НН. По графикам (рис. ба-г) также можно заметить, что при увеличении значения мощности трансформаторов $S_{тр.ном}$ от 25 до 2 500 кВА, увеличивается значение времени наработки на отказ ($T_{нар.отк.}$) от 0,48 года (рис. ба, линия $N_{ТП} = 5$) до 6,43 года (рис.

бг, линия $N_{\text{ТП}} = 2$).

Установлено, что рационально использовать меньшее число распределительных трансформаторов $N_{\text{ТП}}$, равное 1 (при отсутствии резервирования) или 2, так как при $N_{\text{ТП}} = 3-5$ время наработки на отказ $T_{\text{нар.отк.}}$ минимально и равно 1,01 года (рис. 6а, линия $N_{\text{ТП}} = 5$, $S_{\text{ном.тр.}} = 2\ 500$ кВА) и 1,6 года (рис. 6а, линия $N_{\text{ТП}} = 3$, $S_{\text{ном.тр.}} = 2\ 500$ кВА), но при строгом соблюдении значения коэффициента загрузки $K_{\text{зг}} = 0,8$. Например, при использовании 1 распределительного трансформатора $S_{\text{ном.тр.}} = 1000$ кВА в схеме без резервирования – время наработки на отказ ($T_{\text{нар.отк.}} = 3,6$, рис. 6а, линия $N_{\text{ТП}} = 1$) больше, чем при использовании 4-х распределительных трансформаторов такой же мощности ($T_{\text{нар.отк.}} = 1,2$, рис. 6а, линия $N_{\text{ТП}} = 4$) в 2,98 раза.

Параметр потока отказов схемы $\omega_{\text{схемы}}$ обратно пропорционален времени наработки на отказ $T_{\text{нар.отк.}}$ и увеличивается при увеличении количества распределительных трансформаторов. Например, для схемы с резервированием на НН (рис. 6б) при одинаковой мощности распределительных трансформаторов $S_{\text{ном.тр.}} = 1000$ кВА при $N_{\text{ТП}} = 2 - \omega_{\text{схемы}} = 0,181$, а при $N_{\text{ТП}} = 5 - \omega_{\text{схемы}} = 0,309$.

При сравнении вида 4-х вариантов графических зависимостей (рис. 6а-г) установлено, что наибольшее время наработки на отказ достигается для схемы с двойным резервированием ($T_{\text{нар.отк.}} = 6,4$, рис. 6г, линия $N_{\text{ТП}} = 2$), наименьшее – при отсутствии резервирования ($T_{\text{нар.отк.}} = 1,01$, рис. 6а, линия $N_{\text{ТП}} = 5$). Параметры надежности схемы также зависят от расчетной активной мощности нагрузки ($P_{\text{нп}}$), средней мощности нагрузки по всем линиям НН ($S_{\text{ср.нп}}$) и общей площади территории предприятия ($S_{\text{пр/пр}}$).

Заключение (Conclusions)

Для повышения уровня надежности системы внутрицехового электроснабжения рекомендуется использование резервных перемычек на СН и НН, что увеличивает значение времени наработки на отказ с 5,4 года (схема без резервирования) до 23,3 года (схема с резервной перемычкой на НН), 23,8 года (схема с резервной перемычкой на СН) и 25,6 года (схема с двойным резервированием).

Наиболее эффективным является применение двойного резервирования с числом распределительных трансформаторов $N_{\text{ТП}} = 2$, при котором время наработки на отказ достигает максимальных значений. Результаты исследований показывают, что время наработки на отказ имеет максимальное значение ($T_{\text{нар.отк.}} = 6,4$ года) при номинальной мощности трансформаторов $S_{\text{ном.тр.}} = 2\ 500$ кВА в схеме с двойным резервированием на линиях СН и НН, наименьшее – в схеме без резервирования ($T_{\text{нар.отк.}} = 1,01$ год).

Полученные результаты показывают, что выбор номинальной мощности трансформаторов $S_{\text{ном.тр}}$ и установка резервных линий являются одним из факторов повышения надежности и эффективности эксплуатации систем электроснабжения. Полученные результаты могут быть рекомендованы для использования при проектировании схем систем электроснабжения, а также при проведении технико-экономического обоснования выбора оптимальных схемных решений. Полученные результаты исследований позволяют повысить уровень надежности и эффективности эксплуатации оборудования.

Литература

1. Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Ибатуллин Э.Э., Петрова Р.М., Синюкова Т.В. Анализ основных показателей промышленного производства объектов средней мощности // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. №2 (58). С. 93-108.
2. Багаутдинов И.З. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ // Теория и практика современной науки. 2017. №4 (22).
3. Гладких Т.Д. МОДЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕДОБЫЧИ // Омский научный вестник. 2021. №3 (177). С. 59-63.
4. Грачева Е.И., Наумов О.В., Шакурова З.М. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДЕЖНОСТИ НИЗКОВОЛЬТНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ // Вестник КГЭУ. 2018. №3 (39).
5. Зацепина В.И., Астанин С.С. АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С УЧЕТОМ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ // Вестник ТГТУ. 2020. №4.
6. Коннохова Е.А. ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ СХЕМ ПРИ СРАВНЕНИИ ВАРИАНТОВ СИСТЕМ ПРОМЫШЛЕННОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ДВУХТРАНСФОРМАТОРНЫМИ ПОДСТАНЦИЯМИ // Вестник КГЭУ. 2018. №4 (40).

7. Колюхова Е.А. ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СХЕМ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ТЭО ВАРИАНТА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ // Вестник КГЭУ. 2018. №3 (39).

8. Луковенко А.С., Зеньков И.В. МЕТОДЫ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ // Вестник ИргТУ. 2021. №1 (156).

9. Петрова Р.М., Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Valtchev S., Yousef Ibragim. Исследование вероятностных характеристик надежности электрооборудования внутрицеховых систем электроснабжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. №1 (57). С. 93-105.

10. Савина Н.В., Казакул А.А. ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПУТЕМ ВЫДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КЛАСТЕРОВ И АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СХЕМО-РЕЖИМНОЙ СИТУАЦИЕЙ // Известия Транссиба. 2023. №2 (54). С.136-149.

11. Садыков Р.Р. Оценка надежности низковольтных цеховых сетей промышленного электроснабжения // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2017. №5-6.

12. Чжан Цзысюань, Курносос Р.А., Юй Чжичжэн АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ШАХТ КИТАЯ // Известия ТулГУ. Технические науки. 2024. №3. С. 389-396.

13. Шпиганович А.Н., Зацепин Е.П. Оценка отказоустойчивости систем электроснабжения промышленных предприятий // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. №12. С. 29-35.

14. Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А., Петрова Р.М., Грачева Е.И. Исследование отказоустойчивости систем электроснабжения промышленных предприятий // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2024. Т. 16. № 2 (62). С. 94-105.

15. В. He, Y. Liang and J. Xie, "Research on Power Supply Reliability of Intelligent Distribution Network with Automatic Blocking Evaluation," 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.

16. X. Che et al., "Research of Monitoring and Evaluation Approach for Power Supply Reliability Management Based on Online Data Acquisition in New Type Power System," 2024 7th International Conference on Renewable Energy and Power Engineering (REPE), Beijing, China, 2024, pp. 225-229, doi: 10.1109/REPE62578.2024.10810074.

17. Y. Li et al., "Structure and Reliability Design and Experiment of HIAF-BRing Dipole Magnet Pulse Power Supply," 2021 IEEE 1st International Power Electronics and Application Symposium (PEAS), Shanghai, China, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/PEAS53589.2021.9628550.

18. R. Gono, S. Rusek, M. Kratky and Z. Leonowicz, "Reliability analysis of electric distribution system," 2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Rome, Italy, 2011, pp. 1-4, doi: 10.1109/EEEIC.2011.5874842.

19. Y. Zhang et al., "Research on Weak Point Location and Relation Analysis of Power Supply Reliability in New Type Power System," 2024 7th International Conference on Renewable Energy and Power Engineering (REPE), Beijing, China, 2024, pp. 205-209, doi: 10.1109/REPE62578.2024.10809437.

20. Z. Ruifeng, H. Shuqing, D. Donglin, X. Xiaobing and L. Anjiang, "Low Voltage Power Supply Reliability Evaluation of Distribution Network Based on Data Quality Governance," 2020 4th International Conference on Power and Energy Engineering (ICPEE), Xiamen, China, 2020, pp. 75-78, doi: 10.1109/ICPEE51316.2020.9311017.

Авторы публикации

Петрова Рената Маратовна – аспирант Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). <https://orcid.org/0009-0004-2508-8771>. 1998renata@mail.ru

Грачева Елена Ивановна – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>. gracheva.i@bk.ru

References

1. Abdullazyanov, E.Yu.; Gracheva, E.I.; Ibatullin, E.E.; Petrova, R.M.; Sinyukova, T.V. Analysis of the main indicators of the industrial production of medium capacity facilities // Bulletin of Kazan State Power Engineering University. 2023. Т. 15. №2 (58). С. 93-108.

2. Bagautdinov I.Z. Calculating Reliability // Theory and Practice of Modern Science. 2017. №4 (22).
3. Gladkikh T.D. RELIABILITY MODELS OF POWER SUPPLY OF OIL PRODUCTION FACILITIES // Omsk Scientific Bulletin. 2021. No. 3 (177). P. 59-63.
4. Gracheva E.I., Naumov O.V., Shakurova Z.M. INFORMATION PARAMETRICAL CHARACTERISTICS OF RELIABILITY OF LOW-VOLTAGE COMMUTATION APPARATES OF INDUSTRIAL COMPLEXES // Vestnik of KSEU. 2018. №3 (39).
5. Zatsepina, V.I.; Astanin, S.S. Reliability Analyses of the Electric Power Supply System with Taking into Account the Failure-Safe Relay Protection // Vestnik of TSTU. 2020. №4.
6. Konyukhova E.A. ISSUE AND ANALYSIS OF THE RELIABILITY OF CHARACTERS WHEN COMPARING OPTIONS OF SYSTEMS OF INDUSTRIAL ELECTRICAL SUPPLY WITH TWO-TRANSFORMATOR SUBSTATIONS // Vestnik of KSEU. 2018. №4 (40).
7. Konyukhova E.A. EVALUATION OF RELIABILITY ASSESSMENTS OF SCRAMS WHEN FOLLOWING THE Feasibility Study of the Electricity Supply Variant // Vestnik of KSPEU. 2018. №3 (39).
8. Lukovenko A.S., Zenkov I.V. RELIABILITY Calculation Methods of Electric Power Supply System // Bulletin of ISTU. 2021. №1 (156).
9. Petrova R.M., Abdullazyanov E.Yu., Gracheva E.I., Valtchev S., Yousef Ibragim. Investigation of probabilistic characteristics of the reliability of the electrical equipment of the in-shop power supply systems // Bulletin of the Kazan State Power Engineering University. 2023. T. 15. №1 (57). C. 93-105.
10. Savina N.V., Kazakul A.A. INCREASING THE RELIABILITY OF FUNCTIONING OF DISTRIBUTION ELECTRIC NETWORKS BY ALLOCATING ENERGY CLUSTERS AND ADAPTIVE CONTROL OF THE CIRCUIT-MODE SITUATION // Transsib Bulletin. 2023. No. 2 (54). P.136-149.
11. Sadykov, R.R. Reliability assessment of the low-voltage workshop networks of the industrial power supply (in Russian) // Izvestiya vuzov. Problems of power engineering. 2017. №5-6.
12. Zhang Zixuan, Kurnosov R.A., Yu Zhizheng RELIABILITY ANALYSIS OF POWER SUPPLY SYSTEMS OF CHINESE MINES // Bulletin of Tula State University. Technical sciences. 2024. No. 3. P. 389-396.
13. Shpiganovich, A.N.; Zatsepin, E.P. Estimation of the fault tolerance of the power supply systems of the industrial enterprises (in Russian) // Izvestia TulSU. Technical sciences. 2018. №12. C. 29-35.
14. Shpiganovich A.N., Shpiganovich A.A., Petrova R.M., Gracheva E.I.. Investigation of the fault tolerance of the power supply systems of the industrial enterprises // Bulletin of the Kazan State Power Engineering University. 2024. T. 16. № 2 (62). C. 94-105.
15. B. He, Y. Liang and J. Xie, "Research on Power Supply Reliability of Intelligent Distribution Network with Automatic Blocking Evaluation," 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.
16. X. Che et al., "Research of Monitoring and Evaluation Approach for Power Supply Reliability Management Based on Online Data Acquisition in New Type Power System," 2024 7th International Conference on Renewable Energy and Power Engineering (REPE), Beijing, China, 2024, pp. 225-229, doi: 10.1109/REPE62578.2024.10810074.
17. Y. Li et al., "Structure and Reliability Design and Experiment of HIAF-BRing Dipole Magnet Pulse Power Supply," 2021 IEEE 1st International Power Electronics and Application Symposium (PEAS), Shanghai, China, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/PEAS53589.2021.9628550.
18. R. Gono, S. Rusek, M. Kratky and Z. Leonowicz, "Reliability analysis of electric distribution system," 2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Rome, Italy, 2011, pp. 1-4, doi: 10.1109/EEEIC.2011.5874842.
19. Y. Zhang et al., "Research on Weak Point Location and Relation Analysis of Power Supply Reliability in New Type Power System," 2024 7th International Conference on Renewable Energy and Power Engineering (REPE), Beijing, China, 2024, pp. 205-209, doi: 10.1109/REPE62578.2024.10809437.
20. Z. Ruifeng, H. Shuqing, D. Donglin, X. Xiaobing and L. Anjiang, "Low Voltage Power Supply Reliability Evaluation of Distribution Network Based on Data Quality Governance," 2020 4th International Conference on Power and Energy Engineering (ICPEE), Xiamen, China, 2020, pp. 75-78, doi: 10.1109/ICPEE51316.2020.9311017.

Authors of the publication

Renata M. Petrova – Postgraduate student of the Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Kazan State Power Engineering University. <https://orcid.org/0009-0004-2508-8771>. 1998renata@mail.ru.

Elena I. Gracheva – Doctor of Technical Sciences, Professor of the University of Electric Power Industry, Kazan State Power Engineering University. <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>. grachieva.i@bk.ru.

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

Получено **01.08.2025 г.**

Отредактировано **15.10.2025 г.**

Принято **22.10.2025 г.**