

Оценка параметров надежности схем внутриводского электроснабжения с двухтрансформаторными подстанциями

Р. М. Петрова*, Е. И. Грачева

*Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия;
e-mail: 1998renata@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2508-8771>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
01.08.2024;

получена
после доработки
05.09.2024;

принята
к публикации
06.09.2024

Ключевые слова:

система
электроснабжения,
трансформатор,
подстанция, параметры
надежности,
резервирование,
кабельные линии

В процессе проектирования систем внутриводского электроснабжения необходимо определение их рационального резервирования. Надежность системы электроснабжения установлена для следующих вариантов схемы двухтрансформаторных подстанций 10/0,4 кВ: без резервирования; с резервированием (при установке секционного выключателя); с двойным резервированием (при установке секционного выключателя и резервной перемычки на 0,4 кВ). Данные расчетов показали, что надежность схемы без резервирования в 1,87 раза ниже по сравнению со схемой с резервированием и в 3,17 раза ниже – со схемой с двойным резервированием. Получены графические зависимости времени наработки на отказ схем электроснабжения с двухтрансформаторными подстанциями от различной номинальной мощности цеховых трансформаторов для трех вариантов: без резервирования; с резервированием; с двойным резервированием. Оптимальным условием является использование меньшего числа трансформаторных подстанций (соответственно, трансформаторов) при соблюдении значения коэффициента загрузки 0,8. При сравнении графиков установлено, что наибольшее время наработки на отказ достигается при двойном резервировании, наименьшее – при отсутствии резервирования. Результаты исследований могут быть рекомендованы к использованию в процессе проектирования систем внутриводского электроснабжения для оценки и повышения надежности и эффективности эксплуатации оборудования.

Для цитирования

Петрова Р. М. и др. Оценка параметров надежности схем внутриводского электроснабжения с двухтрансформаторными подстанциями. Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 4. С. 521–533. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-521-533>.

Assessment of reliability parameters of in-plant power supply schemes with two-transformer substations

Renata M. Petrova*, Elena I. Gracheva

*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia;
e-mail: 1998renata@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2508-8771>

Article info

Received
01.08.2024;

received
in revised
05.09.2024;

accepted
06.09.2024

Key words:

power supply system,
transformer,
substation,
reliability parameters,
redundancy,
cable lines

Abstract

In the process of designing in-plant power supply systems, it is necessary to determine their rational redundancy. The reliability of the power supply system has been established for the following variants of the circuit of two-transformer 10/0.4 kV substations: without redundancy; with redundancy (when installing a sectional switch); with double redundancy (when installing a sectional switch and a backup jumper for 0.4 kV). The calculation data have shown that the reliability of the circuit without redundancy is 1.87 times lower compared to the circuit with redundancy and 3.17 times lower than with the circuit with double redundancy. Graphic dependencies of the mean time between failures of power supply circuits with two-transformer substations from different rated capacities of shop transformers have been obtained for three variants: without redundancy; with redundancy; with double redundancy. The optimal condition is to use a smaller number of transformer substations (respectively, transformers) while maintaining the load factor of 0.8. When comparing the graphs, it has been found that the longest mean time between failures is achieved with double redundancy, and the shortest – with no redundancy. The research results can be recommended for use in the process of designing in-plant power supply systems to assess and improve the reliability and efficiency of equipment operation.

For citation

Petrova, R. M. et al. 2024. Assessment of reliability parameters of in-plant power supply schemes with two-transformer substations. *Vestnik of MSTU*, 27(4), pp. 521–533. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-521-533>.

Введение

Оценка надежности работы систем электроснабжения производится при проектировании, реконструкции и эксплуатации оборудования (Багаутдинов, 2017; Ivanova et al., 2022). Методы оценки надежности позволяют использовать достаточный минимум исходных данных и обеспечивать достоверные результаты (Садыков, 2017). Элементы систем электроснабжения восстанавливаются после отказа и отключаются при обслуживании и подготовке к ремонту (Петрова и др., 2023); параметры надежности элементов изменяются с течением времени.

Рост нагрузки потребителей и сложность систем электроснабжения (увеличение числа элементов схемы и функциональных взаимосвязей между ними) требуют разработки новых методов расчета надежности сложных многосвязанных систем (Зацепина и др., 2020; Shpigunovich et al., 2021). Расчеты параметров надежности схем низковольтных электрических сетей имеют свои особенности: низковольтное электрооборудование подвержено износу и может выходить из строя (Gasparyan et al., 2018). Так, работа (Абдуллазянов и др., 2023) посвящена анализу основных технико-экономических показателей надежности производств промышленных предприятий.

Одной из основных задач анализа надежности электроэнергетических систем относительно узлов нагрузки является разработка методов определения вероятностей появления отказа и безотказной работы системы (Gracheva et al., 2023; Шпиганович и др., 2018). С увеличением взаимосвязей между элементами расчетной схемы усложняется задача ее преобразования в схему с последовательно-параллельным или параллельно-последовательным соединением элементов (Конюхова и др., 2001; Конюхова, 2018а, 2018б). Например, для схем "мостик" (Шпиганович и др., 2024) и "двойной мостик" правила преобразования последовательно-параллельных или параллельно-последовательных схем надежности неприменимы. Для определения показателей надежности сложных систем используют расчетные элементы с учетом логики функционирования сети.

Целью данного исследования является оценка параметров надежности схемы системы внутриводского электроснабжения. Объектом исследования послужила система внутриводского электроснабжения Казанского завода медицинской аппаратуры. Научная новизна предлагаемой статьи – определение рационального резервирования для системы внутриводского электроснабжения.

Материалы и методы

Участок схемы цеховой сети внутриводского электроснабжения представлен на рис. 1, где указаны следующие исходные данные:

- кабельные линии 0,4 кВ: $L_1 = 10$ м, $L_2 = 10$ м, $L_3, \dots, L_{11} = 5$ м;
- силовые трансформаторы T_1, T_2 ;
- автоматические выключатели АВ₁, АВ₂, АВ₃-секционный, АВ₄, ..., АВ₁₅;
- рубильник Р;
- шкаф распределительный силовой ШРС;
- пункт распределительный силовой ПРС;
- магнитные пускатели ПМ₁, ..., ПМ₄;
- контакторы K_1, \dots, K_5 ;
- двигатели D_1, \dots, D_9 .

Минимально допустимый уровень надежности для коммутационных низковольтных аппаратов согласно ГОСТ 12434-83¹ равен $P_{\text{доп}} = 0,85$.

Предположим, что характеристики надежности элементов оборудования схемы (рис. 1) подчиняются показательному закону распределения (Грачева и др., 2018). Показательный закон распределения параметров надежности оборудования можно принять справедливым на небольшом интервале времени по сравнению с ресурсом долговечности отдельных компонентов системы, когда наблюдается старение материалов, но закончен период приработки.

Рассмотрим показатели надежности элементов схемы электроснабжения (рис. 1):

1) параметр потока отказов $\omega(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Q(t, t + \Delta t)}{\Delta t}$, определяемый вероятностью появления отказа

$Q(t, \Delta t)$ в интервале времени $(t, t + \Delta t)$. Если параметр потока отказов элементов $\omega(t)$ обладает ограниченным последствием (вероятность отказа элементов зависит только от продолжительности их работы с момента последнего отказа), то он совпадает с интенсивностью отказов $\lambda(t)$;

¹ ГОСТ 12434-83. Межгосударственный стандарт. Аппараты коммутационные низковольтные. Общие технические условия. Введен 01.01.1985 г. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200012546>.

- 2) вероятность безотказной работы $P = e^{-\omega}$, где ω – параметр потока отказов;
- 3) вероятность появления отказа $Q = 1 - P = 1 - e^{-\omega}$;
- 4) время наработки на отказ $T_{нар.отк} = \frac{1}{\omega}$.

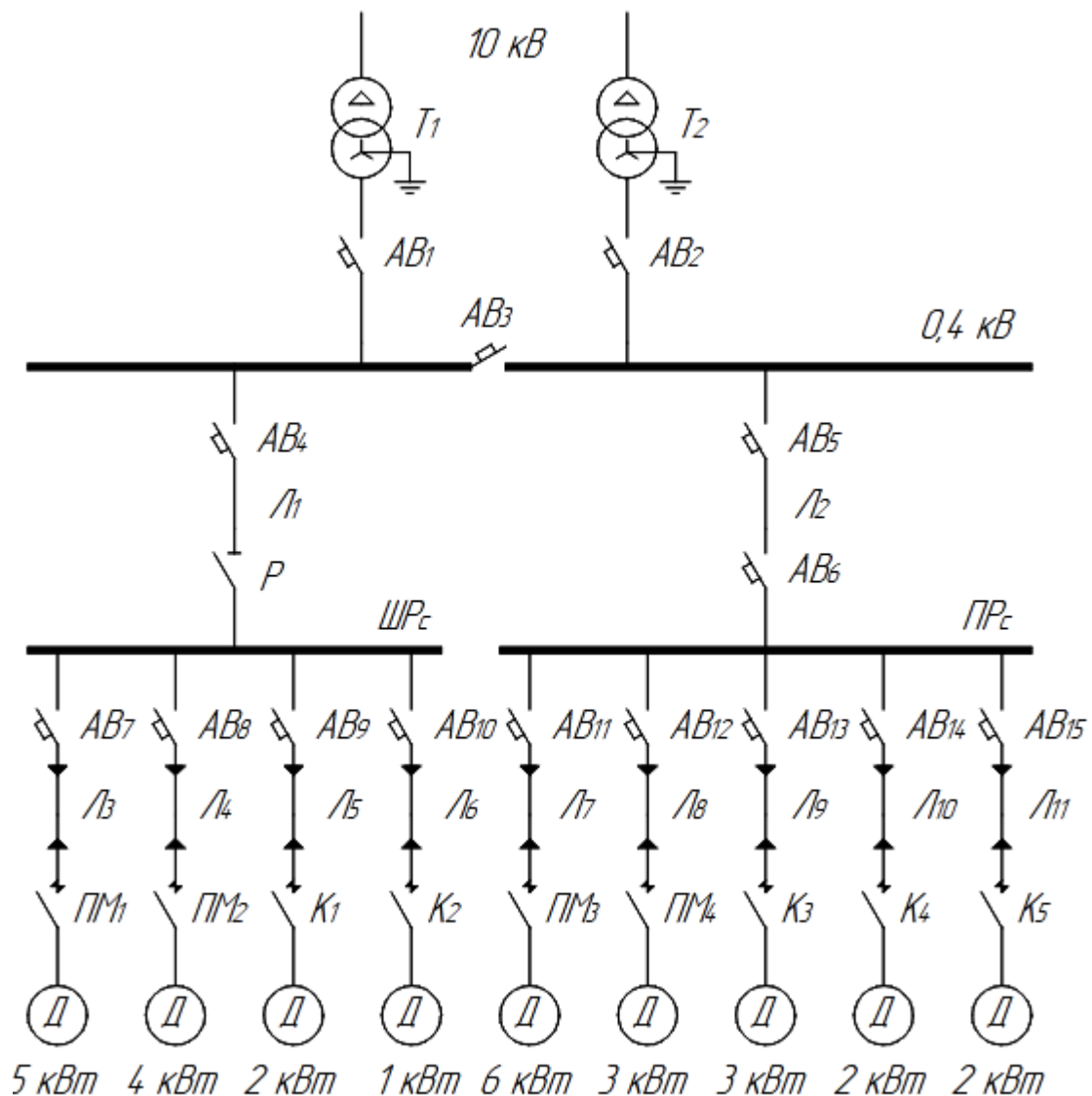


Рис. 1. Схема системы внутриводского электроснабжения
 Fig. 1. Scheme of the in-plant power supply system

В ходе исследования проанализируем возможные виды электрической схемы, представленной на рис. 1:

- без резервирования;
- с резервированием (с секционным выключателем AB_3);
- с двойным резервированием (с секционным выключателем AB_3 и резервной перемычкой на 0,4 кВ).

Результаты и обсуждение

Логическая схема надежности для участка сети (рис. 1) без резервирования

Логическая схема надежности без резервирования показана на рис. 2. Все элементы, расположенные ниже ШРс, соединены последовательно, так как отказ одного элемента вызывает отказ всей системы. Система называется последовательной (системой с основным соединением элементов), если она работает

безотказно при условии исправности каждого элемента. Эффективность работы такой системы зависит от начального состояния системы и последовательности возникновения отказов элементов (узлов).

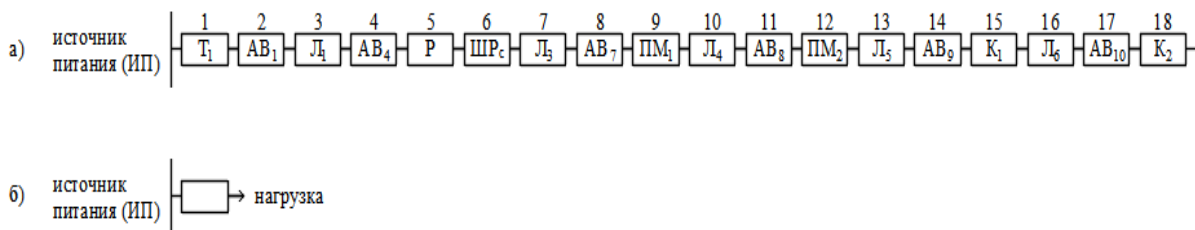


Рис. 2. Логическая схема надежности без резервирования (а) и ее преобразование (б)
Fig. 2. Logical scheme of reliability without redundancy (a) and its transformation (b)

Параметр потока отказов для цепи ИП-нагрузка схемы без резервирования $\omega_{\text{без рез}}$ определим так:

$$\omega_{\text{без рез}} = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 + \omega_5 + \omega_6 + \omega_7 + \omega_8 + \omega_9 + \omega_{10} + \omega_{11} + \omega_{12} + \omega_{13} + \omega_{14} + \omega_{15} + \omega_{16} + \omega_{17} + \omega_{18} =$$

$$= \omega_{T1} + \omega_{AB1} + \omega_{L1} + \omega_{AB4} + \omega_P + \omega_{ШРс} + \omega_{L3} + \omega_{AB7} + \omega_{ПМ1} + \omega_{L4} + \omega_{AB8} + \omega_{ПМ2} + \omega_{L5} + \omega_{AB9} + \omega_{K1} +$$

$$+ \omega_{L6} + \omega_{AB10} + \omega_{K2} = \omega_T + 6\omega_{AB} + 5\omega_L + \omega_P + \omega_{ШРс} + 2\omega_{ПМ} + 2\omega_K,$$

где ω_T – параметр потока отказов трансформатора; ω_{AB} – параметр потока отказов автоматического выключателя; ω_L – параметр потока отказов кабельной линии; ω_P – параметр потока отказов рубильника; $\omega_{ШРс}$ – параметр потока отказов шкафа распределительного силового; $\omega_{ПМ}$ – параметр потока отказов магнитного пускателя; ω_K – параметр потока отказов контактора.

Параметр потока отказов кабельной линии ω_L (АВВГ-0,4 кВ) зависит от длины и рассчитывается с учетом данных на 100 м:

- для L_1, L_2 : $\omega = 0,026 \cdot (10 \text{ м}/100 \text{ м}) = 0,0026$ откл./год;
- для L_3, \dots, L_{11} : $\omega = 0,026 \cdot (5 \text{ м}/100 \text{ м}) = 0,0013$ откл./год.

В табл. 1 приведены технические данные исследуемого оборудования, а также расчетные значения параметров потока отказа элементов схемы.

Таблица 1. Исходные данные оборудования и результаты расчета параметров потоков отказов для элементов схемы
Table 1. Initial equipment data and results of calculating failure flow parameters for circuit elements

Элементы схемы	Марка, производитель ²	Параметр потока отказов ω , откл./год
T_1, T_2	ТМ-1600/10/0,4; "Элтехком", г. Нижний Новгород	0,015
$AB_1, AB_2, AB_3, AB_4, AB_5, AB_6$	ВА51-39; Курский электроаппаратный завод (КЭАЗ), г. Курск	0,051
$AB_7, AB_8, AB_9, AB_{10}, AB_{11}, AB_{12}, AB_{13}, AB_{14}, AB_{15}$	ВА51-35, КЭАЗ	0,051
P	РЕ19-37, КЭАЗ	0,038
$ШРс$	ШРС-1; "Абсолютэнерго", г. Пермь	0,001
$ПРс$	ПР-11; "Абсолютэнерго"	0,001
L_1, L_2	АВВГ-0,4 кВ; сечение $S = 16 \text{ мм}^2$; длина 10 м; "Эксперт-кабель"; гг. Орел, Москва, Екатеринбург	0,026
$L_3, L_4, L_5, L_6, L_7, L_8, L_9, L_{10}, L_{11}$	АВВГ-0,4 кВ; сечение $S = 4 \text{ мм}^2$; длина 5 м; "Эксперт-кабель"	0,0013
$ПМ_1, ПМ_2, ПМ_3, ПМ_4$	ПМЛ-1100; КЭАЗ	0,095
K_1, K_2, K_3, K_4	КТ-6000; КЭАЗ	0,098

Таким образом, параметр потока отказов для цепи ИП-нагрузка схемы без резервирования рассчитаем следующим образом:

$$\omega_{\text{без рез}} = 0,015 + 6 \cdot 0,051 + (0,0026 + 4 \cdot 0,0013) + 0,038 + 0,001 + 2 \cdot 0,095 + 2 \cdot 0,098 = 0,7538.$$

² См.: Каталог продукции компании "Элтехком". URL: <https://eltexkom.com/silovye-transformatory/>; Каталог электротехнической продукции КЭАЗ. URL: <https://keaz.ru/catalog>; Каталог электротехнической продукции ООО "Абсолютэнерго". URL: <https://absolutnrg.ru/catalog/elektrichit/nickovol.html>; Каталог кабельно-проводниковой продукции "Эксперт-кабель". URL: <https://expert-cable.ru/catalog/>.

Логическая схема с резервированием
(с секционным выключателем АВ₃)

Резервированием называется метод повышения надежности, при котором отказавшее изделие заменяется заранее предусмотренным запасным изделием. В зависимости от того, какая часть системы при отказе отключается и заменяется резервной, различают поэлементное, групповое и общее резервирование. Число основных изделий, резервирующих рассматриваемое основное изделие, определяет кратность резервирования. Рассмотрим общее резервирование в условиях облегченного резерва, когда запасные элементы в период ожидания несут частичную нагрузку и могут отказать с меньшей вероятностью, чем вероятность отказа основного элемента.

Для электрической схемы питания первой секции шин с установленным секционным выключателем АВ₃ логическая схема надежности имеет две последовательные рабочие цепи, соединенные параллельно (рис. 3).

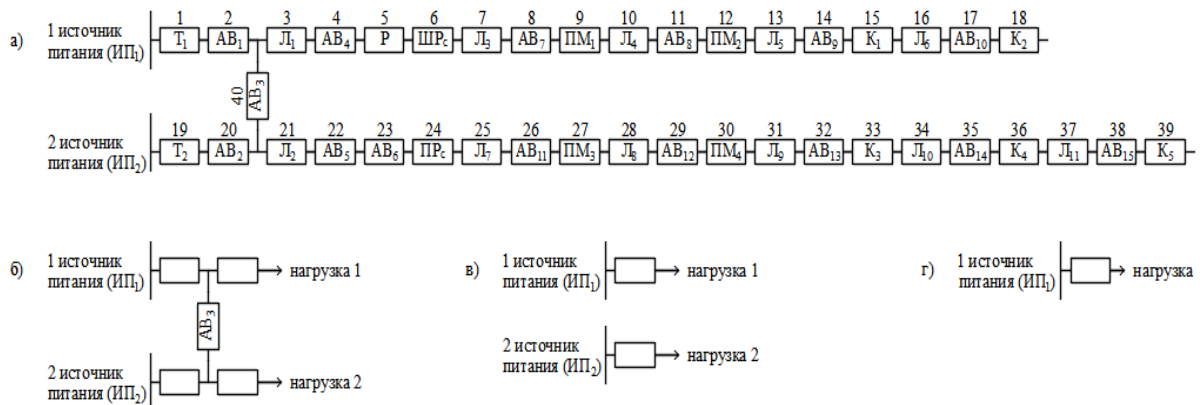


Рис. 3. Логическая схема надежности для системы внутривзаводского электроснабжения с резервированием (а); первый (б), второй (в) и третий (г) этапы преобразования
Fig. 3. Reliability logic diagram for the in-plant power supply system with redundancy (а), conversion stages: first (б), second (в), and third (г)

Первый этап преобразования включает преобразование последовательных ветвей. Параметр потока отказов цепи ИП₁-АВ₃

$$\omega_{ИП_1-АВ_3} = \omega_1 + \omega_2 + \omega_{40} = \omega_{Т_1} + \omega_{АВ_1} + \omega_{АВ} = 0,015 + 0,051 + 0,051 = 0,117.$$

Параметр потока отказов цепи ИП₂-АВ₃

$$\omega_{ИП_2-АВ_3} = \omega_{19} + \omega_{20} = \omega_{Т_2} + \omega_{АВ_2} = 0,015 + 0,051 = 0,066.$$

Параметр потока отказов цепи АВ₃-нагрузка 1

$$\begin{aligned} \omega_{АВ_3-нагр_1} &= \omega_3 + \dots + \omega_{18} = \omega_{Л_1} + \omega_{АВ_4} + \omega_P + \omega_{ШР_с} + \omega_{Л_3} + \omega_{АВ_7} + \omega_{ПМ_1} + \\ &+ \omega_{Л_4} + \omega_{АВ_8} + \omega_{ПМ_2} + \omega_{Л_5} + \omega_{АВ_9} + \omega_{К_1} + \omega_{Л_6} + \omega_{АВ_{10}} + \omega_{К_2} = 5\omega_{АВ} + 5\omega_{Л} + \omega_P + \omega_{ШР_с} + 2\omega_{ПМ} + 2\omega_{К} = \\ &= 5 \cdot 0,051 + (0,0026 + 4 \cdot 0,0013) + 0,038 + 0,001 + 2 \cdot 0,095 + 2 \cdot 0,098 = 0,6878. \end{aligned}$$

Параметр потока отказов цепи АВ₃-нагрузка 2

$$\omega_{АВ_3-нагр_2} = \omega_{21} + \dots + \omega_{39} = 0,8511.$$

Второй этап преобразования включает расчет параметров потока отказов:

– цепи ИП₁-нагрузка 1

$$\omega_{ИП_1-нагр_1} = \omega_{ИП_1-АВ_3} + \omega_{АВ_3-нагр_1} = 0,117 + 0,6878 = 0,8048;$$

– цепи ИП₂-нагрузка 2

$$\omega_{ИП_2-нагр_2} = \omega_{ИП_2-АВ_3} + \omega_{АВ_3-нагр_2} = 0,066 + 0,8511 = 0,9171.$$

На третьем этапе преобразования требуется рассчитать вероятности появления отказа последовательных ветвей.

Вероятности безотказной работы цепей:

$$P_{ИП_1-нагр_1} = e^{-0,8048} = 0,4472, \quad P_{ИП_2-нагр_2} = e^{-0,9171} = 0,3997.$$

Вероятности появления отказа цепей:

$$Q_{ИП_1-нагр_1} = 1 - e^{-0,8048} = 0,5528, \quad Q_{ИП_2-нагр_2} = 1 - e^{-0,9171} = 0,6003.$$

Третий этап включает преобразование параллельных ветвей ИП₁-нагрузка 1 и ИП₂-нагрузка 2.

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

$$Q_{схемы} = Q_{ИП_1-нагр_1} \cdot Q_{ИП_2-нагр_2} = 0,5528 \cdot 0,6003 = 0,3318.$$

Вероятность безотказной работы схемы

$$P_{схемы} = 1 - Q_{схемы} = 1 - 0,3318 = 0,6682.$$

Параметр потока отказов для системы из двух параллельно соединенных элементов определим с учетом вероятности безотказной работы схемы $P_{схемы}$:

$$\omega_{схемы} = -\ln(P_{схемы}) = -\ln(0,6682) = 0,4032.$$

Логическая схема с двойным резервированием

(с секционным выключателем АВ₃ и резервной перемычкой на 0,4 кВ)

Логическая схема надежности с двойным резервированием приведена на рис. 4.

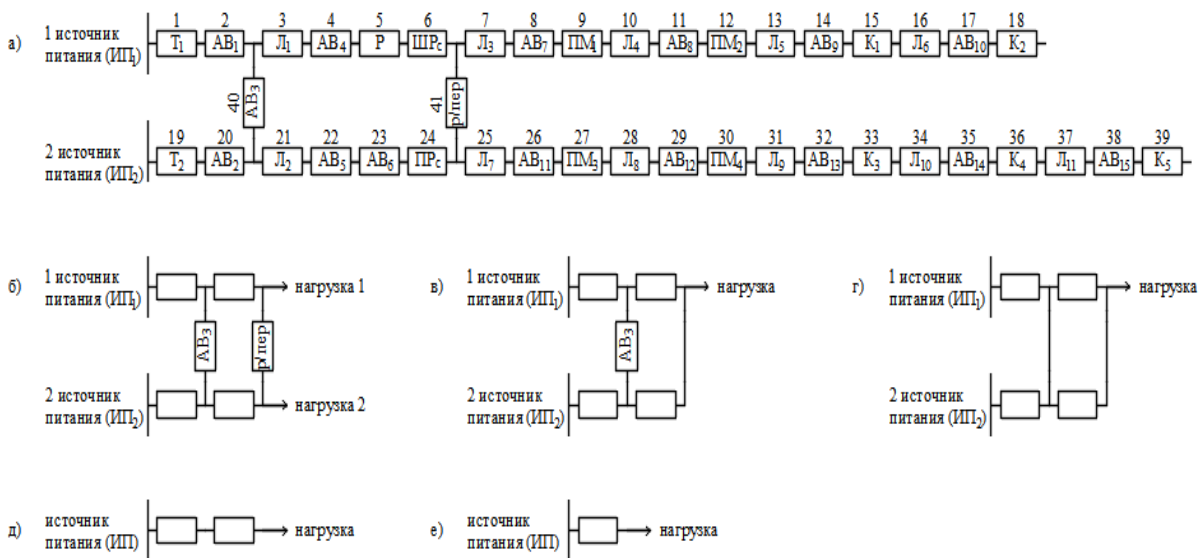


Рис. 4. Логическая схема надежности для системы внутриводского электроснабжения с двойным резервированием (с секционным выключателем АВ₃ и резервной перемычкой на 0,4 кВ) (а), первый (б), второй (в), третий (г), четвертый (д) и пятый (е) этапы преобразования
 Fig. 4. Reliability logic diagram for the in-plant power supply system with double redundancy: with sectional circuit breaker АВ₃ and 0.4 kV backup jumper (а), conversion stages: first (б), second (в), third (г), fourth (д), and fifth (е)

Первый этап преобразования заключается в упрощении всех последовательных ветвей исходной схемы (рис. 4, а):

$$\begin{aligned} \omega_{ИП_1-АВ_3} &= \omega_1 + \omega_2, \quad \omega_{ИП_2-АВ_3} = \omega_{19} + \omega_{20} + \omega_{40}, \\ \omega_{Л_1-ШР_с} &= \omega_3 + \omega_4 + \omega_5 + \omega_6, \quad \omega_{Л_2-ШР_с} = \omega_{21} + \omega_{22} + \omega_{23} + \omega_{24} + \omega_{р/пер}, \\ \omega_{р/пер-нагр_1} &= \omega_7 + \omega_8 + \dots + \omega_{18}, \quad \omega_{р/пер-нагр_2} = \omega_{25} + \omega_{26} + \dots + \omega_{39}. \end{aligned}$$

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

$$P_{ИП_1-АВ_3} = e^{-\omega_{ИП_1-АВ_3}}, \quad P_{ИП_2-АВ_3} = e^{-\omega_{ИП_2-АВ_3}}.$$

Тогда вероятность отказа

$$Q_{ИП_1-АВ_3} = 1 - e^{-\omega_{ИП_1-АВ_3}}, \quad Q_{ИП_2-АВ_3} = 1 - e^{-\omega_{ИП_2-АВ_3}}.$$

Вероятность одновременного отказа параллельных элементов ИП₁-АВ₃ и ИП₂-АВ₃ (рис. 4, з), обозначим Q^* и определим как произведение вероятностей отказа этих элементов:

$$Q^* = Q_{ИП_1-АВ_3} \cdot Q_{ИП_2-АВ_3}.$$

Вероятность безотказной работы параллельных элементов ИП₁-АВ₃ и ИП₂-АВ₃

$$P^* = 1 - Q_{ИП_1-АВ_3} \cdot Q_{ИП_2-АВ_3}.$$

Тогда параметр потока отказов

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

Аналогичный расчет производится для параллельной ветви Л₁-ШРс и Л₂-ПРс.

После преобразования последовательных элементов схемы (рис. 4, д, е) параметр потока отказов схемы

$$\omega_{схемы} = 0,238.$$

В табл. 2 приведены результаты расчетов схем по вариантам для двухтрансформаторной подстанции 10/0,4 кВ (рис. 1).

Таблица 2. Результаты расчета вариантов схемы электроснабжения
Table 2. Calculation results of power supply scheme options

Вариант схемы электроснабжения	Параметр потока отказов $\omega_{схемы}$, откл./год	Время наработки на отказ $T_{нар.отк}$
Без резервирования	0,7538	1,3266
С резервированием (с секционными выключателями АВ ₃)	0,4032	2,4802
С двойным резервированием (с секционными выключателями АВ ₃ и резервной перемычкой на 0,4 кВ)	0,238	4,2017

Данные табл. 2 показывают, что параметр потока отказов без резервирования имеет наибольшее значение ($\omega_{схемы} = 0,7538$) и уменьшается при резервировании, т. е. при включении секционного выключателя ($\omega_{схемы} = 0,4032$). При двойном резервировании $\omega_{схемы} = 0,238$, что свидетельствует о высокой надежности схемы с двойным резервированием при одинаковом количестве присоединений элементов к линии.

Величина времени наработки на отказ $T_{нар.отк}$ обратно пропорциональна параметру потока отказов схемы $\omega_{схемы}$. Время наработки на отказ имеет максимальное значение при двойном резервировании схемы ($T_{нар.отк} = 4,2017$) и минимальное – без резервирования ($T_{нар.отк} = 1,3266$). Данные расчетов показывают, что надежность схемы без резервирования в 1,87 раза ниже в сравнении со схемой с резервированием и в 3,17 раза ниже – схемой с двойным резервированием.

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

Используем исходные данные для расчетов:

- расчетная активная мощность нагрузки $P_T = 12 \cdot 10^6$ Вт;
- $\cos \varphi_{нагр} = 0,92$;
- общая площадь завода $S_{зав} = 0,5$ км²;
- коэффициент загрузки трансформаторов $K_{загр} = 0,8$.

Число трансформаторов

$$N_T = \frac{P_T}{\cos \varphi_T K_{загр} S_T} = \frac{S_{норм. полн. Т}}{K_{загр} S_T},$$

где S_T – единичная номинальная мощность цехового трансформатора, изменяемая от 25 до 2 500 кВА; $K_{загр}$ – коэффициент загрузки трансформатора; $S_{норм. полн. Т}$ – нормируемая полная мощность нагрузки трансформатора, ВА, равная

$$S_{норм. полн. Т} = \frac{P_T}{\cos \varphi_T}.$$

Число двухтрансформаторных подстанций

$$N_{ТП} = \frac{N_T}{2} = \frac{S_{норм. полн. Т}}{2K_{загр} S_T}.$$

На рис. 5 приведены варианты схем системы внутриводского электроснабжения с изменением числа двухтрансформаторных подстанций ($N_{ТП}$ составляет 1–5).

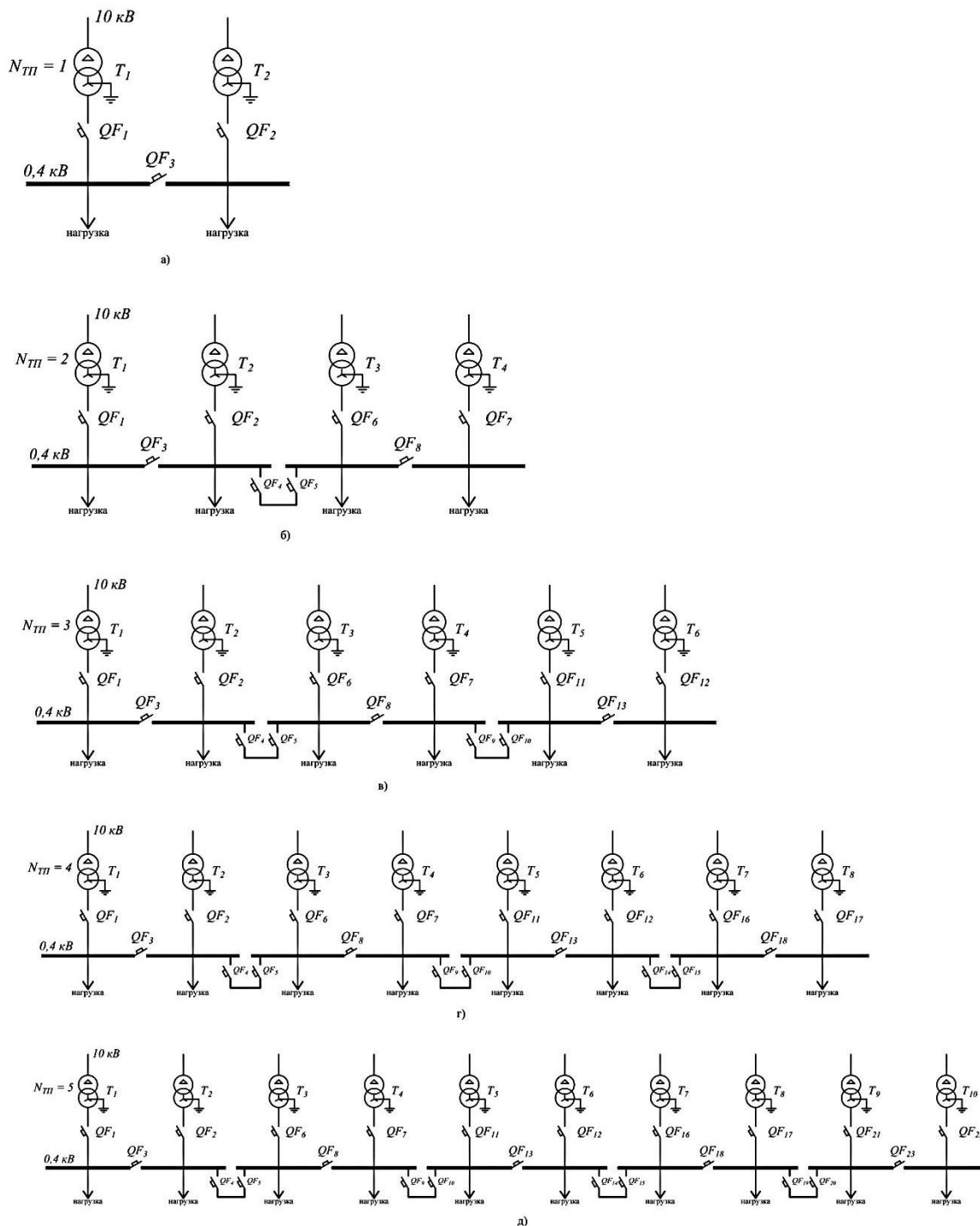


Рис. 5. Электрическая схема системы внутриводского электроснабжения с одной (а), двумя (б), тремя (в), четырьмя (г), пятью (д) двухтрансформаторными подстанциями
 Fig. 5. Electrical scheme of the in-plant power supply system with different number of two-transformer substations: one (a), two (b), three (в), four (г), and five (d)

Расчетное число присоединений трансформатора на 1 секцию шин ($N_{пр.т}$) с учетом остальных присоединений равно

$$N_{пр.т} = N_{ост} + \frac{S_{норм. полн. т}}{n_{сш} N_{ТП} K_{загр} S_{т}},$$

где $N_{ост}$ – остальные присоединения, принимаем $N_{ост} = 1$; число секций шин $n_{сш} = N_{т} = 2, 4, 6, 8, 10$ и т. д.

Суммарный параметр потока отказов трансформаторов $\Sigma\omega_T$, откл./год:

$$\Sigma\omega_T = N_{пр.т} \omega_T,$$

где ω_T – параметр потока отказов трансформатора, равный 0,015 откл./год.

Электрическая схема двухтрансформаторной подстанции с условным обозначением кабельных линий $L_{кл1}$ и $L_{кл2}$ приведена на рис. 6.

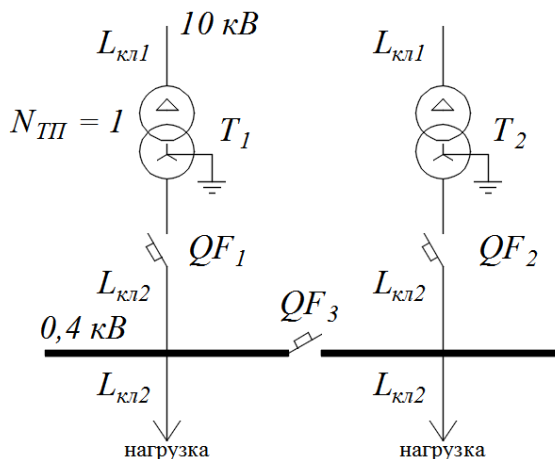


Рис. 6. Электрическая схема двухтрансформаторной подстанции с условным обозначением кабельных линий $L_{кл1}$ и $L_{кл2}$

Fig. 6. Electrical diagram of a two-transformer substation with the conventional designation of cable lines $L_{кл1}$ and $L_{кл2}$

Средняя длина кабельных линий, км, (от источника питания ИП до трансформатора 10/0,4 кВ)

$$L_{кл1} = \gamma_{ИП} \sqrt{N_{ИП} S_{зав}},$$

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

Средняя длина питающих кабельных линий, км, (от трансформатора 10/0,4 кВ до потребителя)

$$L_{кл2} = \gamma_{ТП} \frac{\sqrt{S_{зав}}}{\sqrt{N_{ТП}}},$$

где $\gamma_{ТП}$ – коэффициент, учитывающий расположение ТП, $\gamma_{ТП} = 1$.

Суммарный параметр потока отказов кабельных линий $\Sigma\omega_{кл}$, откл./год:

$$\Sigma\omega_{кл} = \omega_{кл1} + \omega_{кл2} = 0,01L_{кл1} + 0,026L_{кл2},$$

где 0,01 откл./год – параметр потока отказов кабельных линий от ИП до трансформатора; 0,026 откл./год – параметр потока отказов кабельных линий от трансформатора до потребителя.

Приведем пример расчета двухтрансформаторной подстанции $N_{ТП} = 1$, $S_T = 100$ кВА:

$$S_{норм. полн. т} = \frac{P_T}{\cos \phi_T} = \frac{12 \cdot 10^6}{0,92} = 13,1 \cdot 10^6 \text{ ВА},$$

$$N_{пр.т} = N_{ост} + \frac{S_{норм. полн. т}}{n_{сш} N_{ТП} K_{загр} S_T} = 1 + \frac{13,1 \cdot 10^6}{2 \cdot 1 \cdot 0,8 \cdot 100 \cdot 10^3} = 82,875,$$

$$\Sigma\omega_T = N_{пр.т} \omega_T = 82,875 \cdot 0,015 = 1,24 \text{ откл./год},$$

$$L_{кл1} = \gamma_{ИП} \sqrt{N_{ИП} S_{зав}} = 1 \cdot \sqrt{0,5 \cdot 1} = 0,707 \text{ км},$$

$$L_{кл2} = \gamma_{ТП} \frac{\sqrt{S_{зав}}}{\sqrt{N_{ТП}}} = 1 \cdot \frac{\sqrt{0,5}}{\sqrt{1}} = 0,707 \text{ км},$$

$$\Sigma\omega_{кл} = \omega_{кл1} + \omega_{кл2} = 0,01L_{кл1} + 0,026L_{кл2} = 0,01 \cdot 0,707 + 0,026 \cdot 0,707 = 0,025 \text{ откл./год}.$$

Далее рассчитывается $\omega_{схемы}$ с учетом всех элементов схемы:

– без резервирования: $\omega_{схемы} = 0,9764$; $T_{нар. отк} = 1,0242$;

– с резервированием (с секционным выключателем АВ₃): $\omega_{схемы} = 0,6017$; $T_{нар. отк} = 1,6620$;

– с двойным резервированием (с секционным выключателем АВ₃ и резервной перемычкой на 0,4 кВ):

$$\omega_{схемы} = 0,4665; T_{нар. отк} = 2,1437.$$

На рис. 7–9 приведены графические зависимости времени наработки на отказ $T_{нар.отк}$ схем с числом двухтрансформаторных подстанций от 1 до 5 и различной номинальной мощностью цеховых трансформаторов 10/0,4 кВ (от 25 до 2 500 кВА).

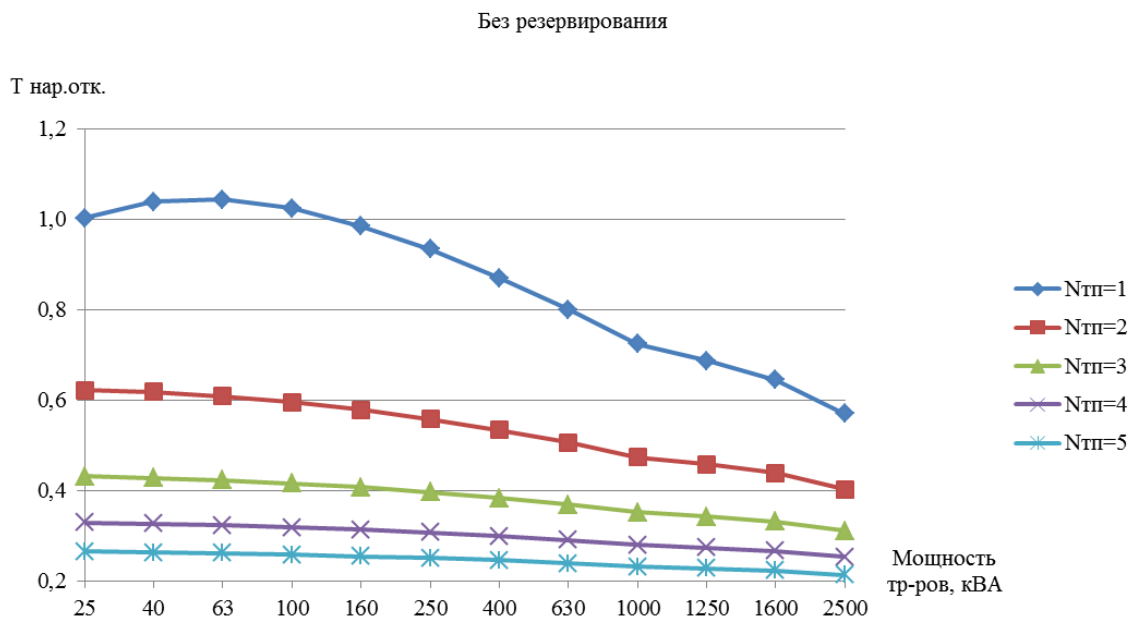


Рис. 7. Графические зависимости времени наработки на отказ схемы без резервирования от номинальной мощности цеховых трансформаторов при различном числе ТП
 Fig. 7. Graphic dependences of the time between failures of a circuit without redundancy on the rated power of shop transformers at different number of substations

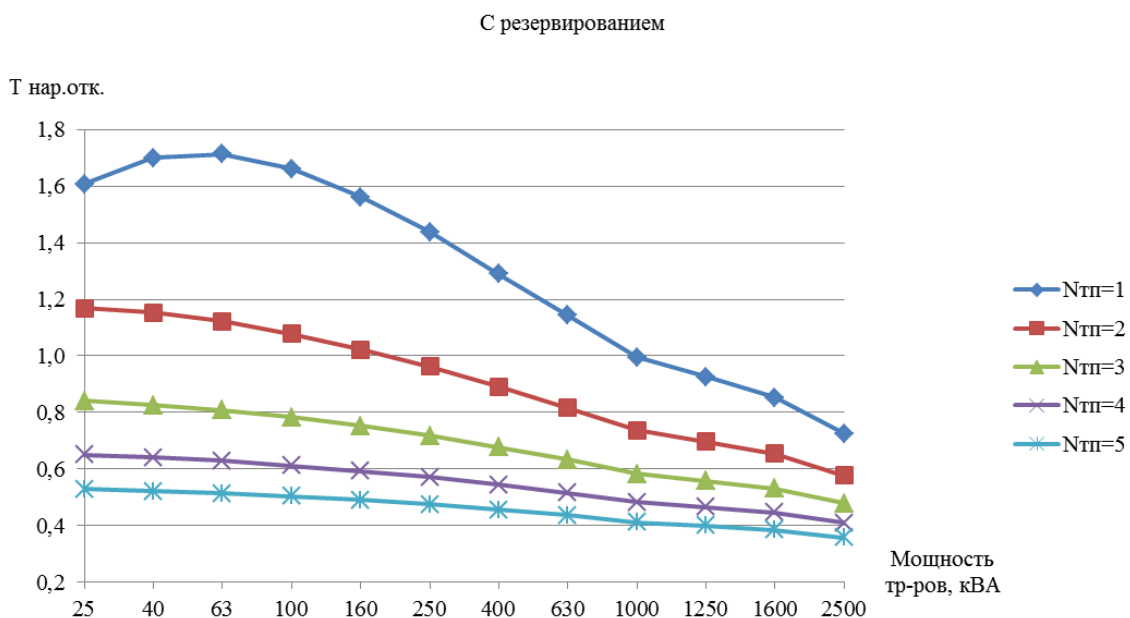


Рис. 8. Графические зависимости времени наработки на отказ схемы с резервированием (с секционным выключателем АВ₃) от номинальной мощности цеховых трансформаторов при различном числе ТП
 Fig. 8. Graphic dependences of the time between failures of a circuit with redundancy (with sectional switch АВ₃) on the rated power of shop transformers at different number of substations

Графики рис. 7–9 показывают, что оптимальное значение номинальной мощности трансформаторов $S_{т. опт}$ уменьшается при увеличении числа трансформаторных подстанций $N_{ТП}$; оптимальное значение мощности трансформаторов достигается при большем времени наработки на отказ.

С двойным резервированием

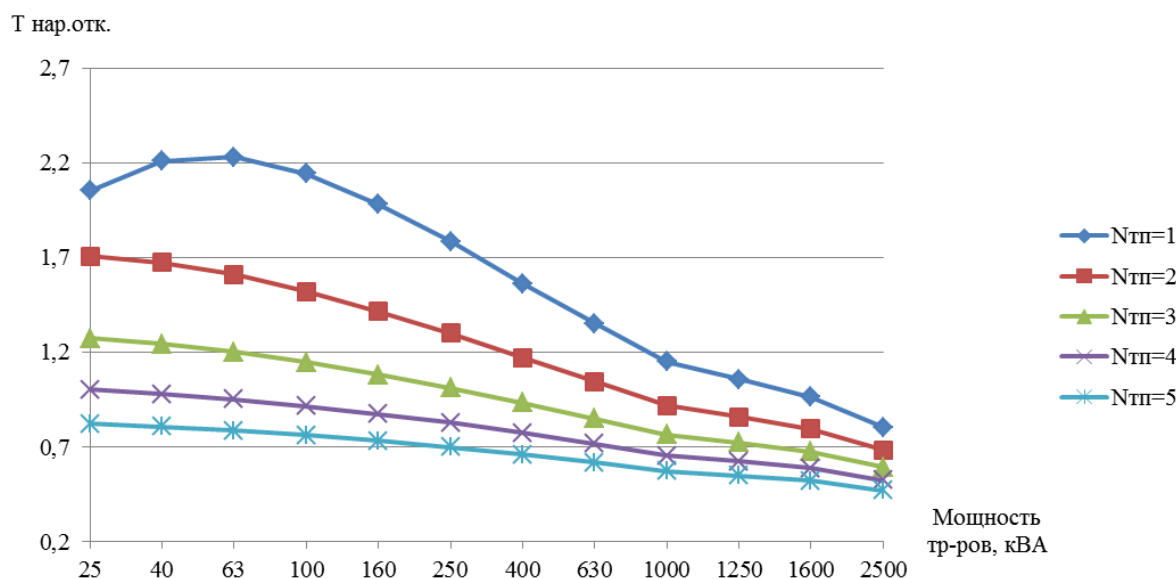


Рис. 9. Графические зависимости времени наработки на отказ схемы с двойным резервированием (с секционным выключателем АВ₃ и резервной перемычкой на 0,4 кВ) от номинальной мощности цеховых трансформаторов при различном числе ТП
Fig. 9. Graphical dependencies of the mean time between failures of a dual redundancy scheme (with sectional circuit breaker АВ₃ and redundant jumper at 0.4 kV) on the rated capacity of shop transformers at different number of substations

Также оптимальным условием является использование меньшего числа трансформаторных подстанций $N_{ТП}$ и, соответственно, трансформаторов при соблюдении значения коэффициента загрузки ($K_{загр} = 0,8$). Например, при использовании 2 трансформаторов мощностью 1 600 кВА время наработки на отказ будет больше ($T_{нар.отк} = 0,6456$), чем при использовании 4 трансформаторов такой же мощности ($T_{нар.отк} = 0,4390$).

При сравнении графиков, изображенных на рис. 7–9, установлено, что наибольшее время наработки на отказ достигается при двойном резервировании ($T_{нар.отк} = 2,2301$), наименьшее – при отсутствии резервирования ($T_{нар.отк} = 0,5709$).

Заключение

При исследовании надежности системы внутризаводского электроснабжения необходимо проанализировать дефекты и механизмы отказов, исключить известные причины отказов, определить зависимости параметров надежности от интенсивности внешних воздействий.

Резервирование целесообразно использовать для увеличения параметра вероятности безотказной работы схемы с течением времени, значительно меньшего, чем величина средней наработки на отказ резервного оборудования. Параметр потока отказов схемы с резервированием (с секционным выключателем АВ₃) больше ($\omega_{схемы} = 0,4032$), чем параметр потока отказов с двойным резервированием (с секционным выключателем и резервной перемычкой на 0,4 кВ) ($\omega_{схемы} = 0,238$) при одинаковом количестве присоединений элементов к линии. Установлено, что надежность схемы с резервированием значительно выше в сравнении со схемой без резервирования при одинаковой нагрузке (параметр потока отказов схемы без резервирования $\omega_{без рез} = 0,7538$). Время наработки на отказ имеет максимальное значение при оптимальном значении номинальной мощности трансформаторов $S_{т. опт}$ в схеме с двойным резервированием.

Результаты исследований могут быть рекомендованы к использованию при проектировании систем внутризаводского электроснабжения для оценки и повышения надежности эксплуатации оборудования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Абдуллазянов Э. Ю., Грачева Е. И., Ибатуллин Э. Э., Петрова Р. М. [и др.]. Анализ основных показателей промышленного производства объектов средней мощности // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15, № 2(58). С. 93–108. EDN: HEHNXC.
- Багаутдинов И. З. Расчет надежности // Теория и практика современной науки. 2017. № 4(22). С. 96–99. EDN: YURTFT.
- Грачева Е. И., Наумов О. В., Шакурова З. М. Информационные параметрические характеристики надежности низковольтных коммутационных аппаратов промышленных комплексов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2018. № 3(39). EDN: QUERVT.
- 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. DOI: <https://doi.org/10.17277/vestnik.2020.04.pp.564-570>. EDN: LIPVUD.
- Конюхова Е. А., Киреева Э. А. Надежность электроснабжения промышленных предприятий. М. : НТФ "Энергопрогресс", 2001. 92 с. (Библиотека электротехника – прил. к журналу "Энергетик" ; вып. 12(36)).
- Конюхова Е. А. Исследование и анализ надежности схем при сравнении вариантов систем промышленного электроснабжения с двухтрансформаторными подстанциями // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2018а. № 4(40). С. 66–76. EDN: FQSCHV.
- Конюхова Е. А. Оценка показателей надежности схем при выполнении ТЭО варианта электроснабжения объектов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2018б. № 3(39). С. 34–44. EDN: ELIKRG.
- Петрова Р. М., Абдуллазянов Э. Ю., Грачева Е. И., Valtchev S. [и др.]. Исследование вероятностных характеристик надежности электрооборудования внутрицеховых систем электроснабжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15, № 1(57). С. 93–105. EDN: CWPQDQ.
- Садыков Р. Р. Оценка надежности низковольтных цеховых сетей промышленного электроснабжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19, № 5–6. С. 98–108. EDN: ZIXFIF.
- Шпиганович А. Н., Зацепин Е. П. Оценка отказоустойчивости систем электроснабжения промышленных предприятий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 12. С. 29–35. EDN: VQUCCS.
- 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. EDN: NOVSTK.
- Gasparyan A. A., Komarova G. V. Reliability assessment of a technical equipment complex of a monitoring system of parameters for electrical equipment taking into account reserve elements // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Moscow and St. Petersburg, 2018. P. 632–635. DOI: <https://doi.org/10.1109/eiconrus.2018.8317176>.
- Gracheva E., Petrova R. M., Valtchev S., Sinyukova T. Study of probability characteristics of the reliability of electrical equipment in internal power supply systems // 5th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM), Nevsehir, Turkiye, 2023. P. 460–465. DOI: <https://doi.org/10.1109/gpecom58364.2023.101758211>.
- Ivanova S. P., Pestryaev D. A., Myasnikova T. V., Sveklova O. V. Reliability assessment of switching process control equipment // 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, 2022. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/reepe53907.2022.9731393>.
- Shpiganovich A., Shpiganovich A., Boychevskiy A. Assessment of reliability of individual units electrical equipment by characteristics power supply systems // 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, 2021. P. 1088–1090. DOI: <https://doi.org/10.1109/summa53307.2021.9632126>.

References

- Abdullazyanov, E. Yu., Gracheva, E. I., Ibatullin, E. E., Petrova, P. M. et al. 2023. Analysis of the main indicators of industrial production of facilities of average capacity. *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo Energeticheskogo Universiteta*, 15(2(58)), pp. 93–108. EDN: HEHNXC. (In Russ.)
- Bagautdinov, I. Z. 2017. Reliability calculation. *Teoriya i Praktika Sovremennoi Nauki*, 4(22), pp. 96–99. EDN: YURTFT. (In Russ.)
- Gracheva, E. I., Naumov, O. V., Shakurova, Z. M. 2018. Information parametrical characteristics of reliability of low-voltage commutation apparatuses of industrial complexes. *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo Energeticheskogo Universiteta*, 3(39). EDN: QUERVT. (In Russ.)
- Zatsepina, V. I., Astanin, S. S. 2020. Reliability analysis of the electrical power supply system with taking into account the fail-safety of the relay protection. *Transactions TSTU*, 4, pp. 564–570. DOI: <https://doi.org/10.17277/vestnik.2020.04.pp.564-570>. EDN: LIPVUD. (In Russ.)
- Konyukhova, E. A., Kireeva, E. A. 2001. Reliability of power supply of industrial enterprises. Moscow. (In Russ.)

- Konyukhova, E. A. 2018a. Research and analysis of the reliability of schemes when comparing options of industrial electrical supply systems with double-transformator substations. *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo Energeticheskogo Universiteta*, 4(40), pp. 66–76. EDN: FQSCHV. (In Russ.)
- Konyukhova, E. A. 2018b. Evaluation of reliability assessments of circuits in the feasibility study of the variant of electric power supply of objects. *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo Energeticheskogo Universiteta*, 3(39), pp. 34–44. EDN: ELIKRG. (In Russ.)
- Petrova, R. M., Abdullazyanov, E. Yu., Gracheva, E. I., Valtchev, S. et al. 2023. Study of probability characteristics of reliability of electrical equipment in internal power supply systems. *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo Energeticheskogo Universiteta*, 15(1(57)), pp. 93–105. EDN: CWPQDQ. (In Russ.)
- Sadykov, R. R. 2017. Reliability assessment of low-voltage shop networks of industrial power supply. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, 19(5–6), pp. 98–108. EDN: ZIXFIF. (In Russ.)
- Shpiganovich, A. N., Zatsepin, E. P. 2018. Estimation of the fault tolerance of the power supply systems of the industrial enterprises. *Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*, 12, pp. 29–35. EDN: VQUCCS. (In Russ.)
- Shpiganovich, A. N., Shpiganovich, A. A., Petrova, R. M., Gracheva, E. I. 2024. Study of fault tolerance of power supply systems of industrial enterprises. *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo Energeticheskogo Universiteta*, 16(2(62)), pp. 94–105. EDN: NOVSTK. (In Russ.)
- Gasparyan, A. A., Komarova, G. V. 2018. Reliability assessment of a technical equipment complex of a monitoring system of parameters for electrical equipment taking into account reserve elements. IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Moscow and St. Petersburg, pp. 632–635. DOI: <https://doi.org/10.1109/eiconrus.2018.8317176>.
- Gracheva, E., Petrova, R. M., Valtchev, S., Sinyukova, T. 2023. Study of probability characteristics of the reliability of electrical equipment in internal power supply systems. 5th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM), Nevsehir, Turkiye, pp. 460–465. DOI: <https://doi.org/10.1109/gpecom58364.2023.101758211>.
- Ivanova, S. P., Pestryaev, D. A., Myasnikova, T. V., Sveklova, O. V. 2022. Reliability assessment of switching process control equipment. 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/reepe53907.2022.9731393>.
- Shpiganovich, A., Shpiganovich, A., Boychevskiy, A. 2021. Assessment of reliability of individual units electrical equipment by characteristics power supply systems. 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, pp. 1088–1090. DOI: <https://doi.org/10.1109/summa53307.2021.9632126>.

Сведения об авторах

Петрова Рената Маратовна – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066;
Казанский государственный энергетический университет, аспирант;
e-mail: 1998renata@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2508-8771>

Renata M. Petrova – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066;
Kazan State Power Engineering University, Postgraduate Student;
e-mail: 1998renata@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2508-8771>

Грачева Елена Ивановна – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066;
Казанский государственный энергетический университет, д-р техн. наук, профессор;
e-mail: gracheva.i@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>

Elena I. Gracheva – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066;
Kazan State Power Engineering University, Dr Sci. (Engineering), Professor;
e-mail: gracheva.i@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>