

УДК 621.311

## Методы оценки надежности схем внутрицехового электроснабжения

Р. М. Петрова\*, Е. И. Грачева, S. Valtchev, Н. К. Мифтахова

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

### Информация о статье

Поступила  
в редакцию  
29.08.2023;

получена  
после доработки  
27.09.2023;

принята к публикации  
03.10.2023

### Ключевые слова:

схема внутрицехового  
электроснабжения,  
системы распределения  
электроэнергии,  
электрические аппараты,  
кабельные линии,  
методы оценки  
надежности

### Реферат

Научно-исследовательская деятельность в области развития электроэнергетического и электротехнического оборудования включает разработку новых подходов к оценке показателей надежности элементов электрооборудования и в целом систем внутрицехового электроснабжения. В ходе исследования рассмотрены методы оценки надежности работы электрооборудования в системах внутрицехового электроснабжения на примере участка цеховой сети, включающей ее основные элементы: силовой трансформатор, кабельные линии низкого напряжения, распределительные пункты, автоматические выключатели, магнитные пускатели, контакторы, рубильники. Параметры надежности схемы рассчитаны относительно распределительного шкафа силового ШРС и распределительного пункта силового ПРС; относительно каждого присоединения ШРС и ПРС. Рассматриваемые методы рекомендуется использовать для уточнения периодичности и сроков проведения технического обслуживания и ремонтов электрооборудования системы внутрицехового электроснабжения, а также для анализа надежности работы и выявления наименее надежных участков схем сетей. Представленный расчет с использованием логико-вероятностного метода с помощью построения дерева отказов целесообразно применять для оценки частоты потери питания ШРС и ПРС, а также отдельных присоединений. Для исследуемых схем построены графические зависимости вероятности безотказной работы электрооборудования и появления отказа во времени.

### Для цитирования

Петрова Р. М. и др. Методы оценки надежности схем внутрицехового электроснабжения. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 4. С. 395–409. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-395-409>.

## Methods for assessing the reliability of in-shop power supply

Renata M. Petrova\*, Elena I. Gracheva, S. Valtchev, Naila K. Miftakhova

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

### Article info

Received  
29.08.2023;

received  
in revised  
27.09.2023;

accepted  
03.10.2023

### Key words:

scheme of in-shop  
power supply,  
power  
distribution systems,  
electrical apparatuses,  
cable lines,  
reliability assessment  
methods

### Abstract

Research activities in the field of development of electrical power and electrical equipment include the development of new approaches to assessing the reliability indicators of electrical equipment elements and in-house power supply systems in general. The study has examined methods for assessing the reliability of electrical equipment in intra-shop power supply systems using the example of a workshop network section, including its main elements: power transformer, low-voltage cable lines, distribution points, circuit breakers, magnetic starters, contactors, switches. The reliability parameters of the circuit are calculated relative to the distribution cabinet of the power (DCp) and the distribution point of the power (DPP); regarding each connection of DCp and DPP. The methods under consideration are recommended to be used to clarify the frequency and timing of maintenance and repairs of electrical equipment of the in-shop power supply system, as well as to analyze the reliability of operation and identify the least reliable sections of network diagrams. The presented calculation using the logical-probabilistic method by constructing a fault tree is advisable to use to estimate the frequency of power loss of DCp and DPP, as well as individual connections. For the studied circuits, graphical dependences of the probability of failure-free operation of electrical equipment and the occurrence of a failure over time have been constructed.

### For citation

Petrova, R. M. et al. 2023. Methods for assessing the reliability of in-shop power supply. *Vestnik of MSTU*, 26(4), pp. 395–409. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-395-409>.

## Введение

Современные промышленные предприятия характеризуются динамичностью технологического процесса, обусловленной введением различных методов обработки, нового оборудования, переналадкой производства в связи с непрерывным усовершенствованием выпускаемой продукции. С развитием новых типов оборудования актуализируется проблема определения основных показателей надежности и эффективности функционирования оборудования систем внутрицехового электроснабжения (Petrov et al., 2020).

Оценка надежности электрооборудования и электрических сетей систем электроснабжения потребителей представлена в статье (Виноградов и др., 2015). Данная оценка включает определение причин повреждений воздушных и кабельных линий 0,38 кВ и 6–10 кВ, трансформаторных подстанций 10/0,4 кВ и распределительных пунктов; установление основных показателей надежности (частоты отказов и времени восстановления оборудования); оценку ущерба от недоотпуска электроэнергии потребителям; сравнение статистических параметров надежности рассматриваемых электрических сетей с данными литературных источников. В статье представлены основные мероприятия по повышению надежности электроснабжения потребителей за счет снижения количества отказов электрооборудования.

В работе (Грачева и др., 2018) приведен алгоритм установления законов распределения вероятностных характеристик надежности низковольтных коммутационных аппаратов на примере контакторов серии ПМЛ (Курский электроаппаратный завод, КЭАЗ, г. Курск) на основании случайных выборок при проведении наблюдений за отказами аппаратов в одинаковых эксплуатационных условиях ряда промышленных предприятий г. Казани. Имитационная модель, выполненная в программе Matlab-Simulink, позволяет рассчитывать фиксированные интенсивности отказов аппаратов по случайным выборкам.

В исследовании (Грачева и др., 2019а) приведен алгоритм оценки параметров надежности (вероятности работоспособного состояния низковольтных аппаратов во времени) на основании статистических данных об отказах автоматических выключателей, установленных в цепях управления и защиты потребителей промышленных предприятий; рассмотрены теоретическая и статистическая функции вероятности безотказной работы автоматических выключателей в зависимости от срока службы и режимов эксплуатации. Вид распределения параметров надежности низковольтных аппаратов определен на примере автоматических выключателей ВА-57; получены аналитические и графические зависимости основных показателей надежности.

Работа (Грачева и др., 2019б) посвящена исследованию надежности функционирования системы внутрицехового электроснабжения на основе распределительного шкафа и распределительного пункта производственного предприятия с использованием аналитического и статического методов расчета.

Авторами статьи (Зацетина и др., 2020) рассматривается проблема надежности систем электроснабжения. По результатам анализа для построения систем автоматики предложен ряд математических выражений, позволяющих на стадии проектирования провести оценку отказоустойчивости системы электроснабжения при выбранных устройствах защиты, тем самым упростить процесс выбора наиболее предпочтительной системы, основываясь на полученных показателях.

Алгоритм и методика оценки показателей надежности при технико-экономическом сравнении вариантов схем промышленного электроснабжения предложены в работе (Конюхова, 2018). Автором определены зависимости времени наработки на отказ схемы электроснабжения от номинальной мощности трансформаторов двухтрансформаторных подстанций при наличии и отсутствии резервирования на распределительном устройстве низкого напряжения.

Исследование, проведенное учеными (Петрова и др., 2023; Gracheva et al., 2023), включало: 1) установление законов изменения вероятностных характеристик надежности низковольтного электрооборудования (силовых трансформаторов, автоматических выключателей, магнитных пускателей и контакторов) на основании статистических данных эксплуатации; 2) проверку на соответствие вероятностных характеристик электрооборудования нормальному закону распределения с использованием критерия Колмогорова; 3) определение видов функций изменения основных параметров надежности электрооборудования с указанием соответствующих графических зависимостей; 4) сравнение полученных результатов значений вероятности безотказной работы с требованиями ГОСТа<sup>1</sup>.

Статья (Садыков, 2017) посвящена разработке методики оценки показателей надежности функционирования системы внутрицехового электроснабжения на примере радиальных схем. При анализе статистических данных моделировалось изменение вероятности времени безотказной работы распределительных устройств в зависимости от количества присоединений нагрузки с применением коэффициента отношения вероятности присоединений.

---

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

Результаты исследования надежности систем электроснабжения, полученные в работе (Секретарев и др., 2022), должны учитываться на этапах планирования, проектирования и строительства. На основе статистической информации об отказах авторами рассчитаны результирующие параметры надежности и вероятности безотказной работы для исследуемых схем; разработана и реализована имитационная модель для моделирования текущего технического состояния электрооборудования.

В статьях (Шпиганович и др., 2018; Shpigianovich et al., 2021) проанализированы внешние и внутренние факторы, влияющие на надежность электрооборудования систем электроснабжения в процессе эксплуатации (превышение влажности воздуха; агрессивность сред, пыли; неблагоприятные атмосферные явления; механические и электрические нагрузки и т. д.), и показаны изменения основных свойств материалов электроустановок в зависимости от воздействия различных факторов.

В настоящее время в связи с динамичностью технологических процессов на современных промышленных предприятиях требуются новые подходы к оценке показателей надежности элементов электрооборудования и систем внутрицехового электроснабжения в целом. Цель настоящего исследования заключается в оценке и анализе основных характеристик надежности электрооборудования низковольтных цеховых сетей.

### Материалы и методы

Объектом исследования являлись системы внутризаводского электроснабжения. На рис. 1 показана схема участка цеховой сети, для которой рассчитаны параметры надежности. Система состоит из высоконадежных элементов, т. е. время безотказной работы превышает время восстановления электроустановки, а отказ более двух независимых элементов – событие маловероятное.

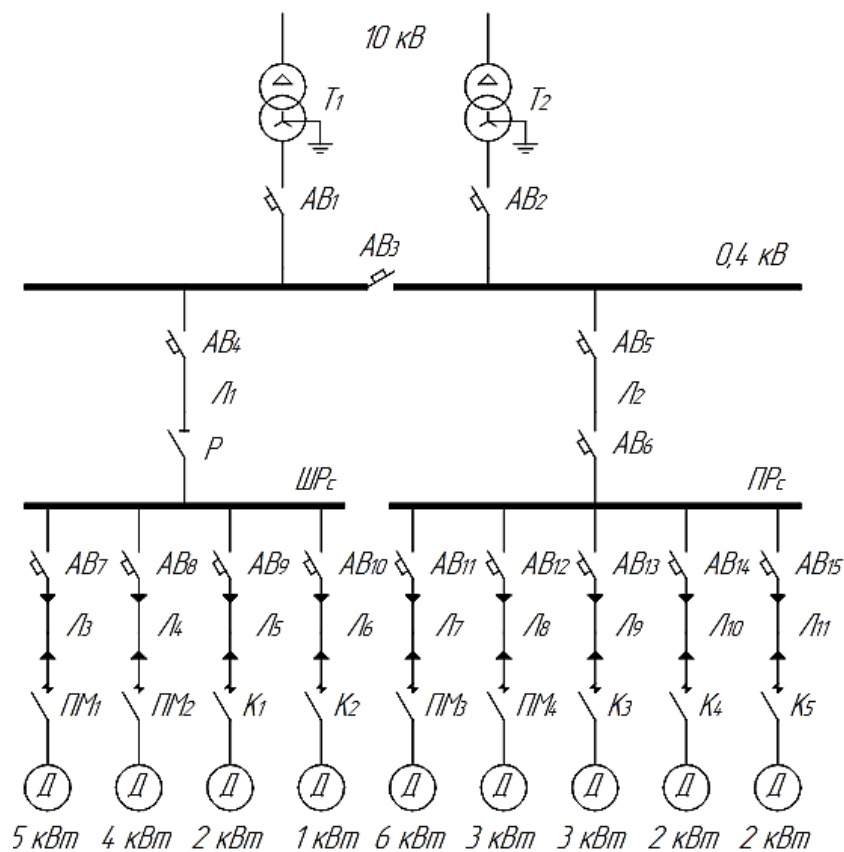


Рис. 1. Схема системы внутризаводского электроснабжения

Fig. 1. Scheme of the in-plant power supply system

Представим описание схемы (рис. 1) и исходные данные:

- длина линий:  $L_1 = 10$  м,  $L_2 = 10$  м,  $L_3 = 5$  м,  $L_4 = 5$  м,  $L_5 = 5$  м,  $L_6 = 5$  м,  $L_7 = 5$  м,  $L_8 = 5$  м,  $L_9 = 5$  м,  $L_{10} = 5$  м,  $L_{11} = 5$  м;
- трансформаторы:  $T_1$  – ТМ-1600/10/0,4;  $T_2$  – ТМ-1600/10/0,4;
- автоматические выключатели  $AB_1, AB_2, AB_3$ -секционный,  $AB_4, AB_5, AB_6, AB_7, AB_8, AB_9, AB_{10}, AB_{11}, AB_{12}, AB_{13}, AB_{14}, AB_{15}$ ;
- рубильник Р;

– шкаф распределительный силовой ШРС;  
 – пункт распределительный силовой ПРС;  
 – магнитные пускатели ПМ<sub>1</sub>, ПМ<sub>2</sub>, ПМ<sub>3</sub>, ПМ<sub>4</sub>;  
 – контакторы К<sub>1</sub>, К<sub>2</sub>, К<sub>3</sub>, К<sub>4</sub>, К<sub>5</sub>;  
 – нагрузка: Д<sub>1</sub> = 5 кВт, Д<sub>2</sub> = 4 кВт, Д<sub>3</sub> = 2 кВт, Д<sub>4</sub> = 1 кВт, Д<sub>5</sub> = 6 кВт, Д<sub>6</sub> = 3 кВт, Д<sub>7</sub> = 3 кВт, Д<sub>8</sub> = 2 кВт,  
 Д<sub>9</sub> = 2 кВт;  
 – время наблюдения  $t = 6$  лет;  
 – минимально допустимый уровень надежности для коммутационных низковольтных аппаратов согласно ГОСТ 12434-83  $R_{\text{доп}} = 0,85^2$ .

Рассчитаем параметры надежности схемы (рис. 1), используя следующие методы:

- 1) относительно распределительного шкафа ШРС и распределительного пункта ПРС;
- 2) относительно каждого присоединения ШРС и ПРС;
- 3) логико-вероятностный метод.

Справочные и каталожные данные электротехнической продукции отечественных заводов-изготовителей приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты расчета оценки интенсивности отказов по элементам схемы  
 Table 1. Results of calculation of failure rate estimation by circuit elements

Элемент схемы	Марка; завод- изготовитель	Интенсивность отказов $\lambda$ , откл./год	Элемент схемы	Марка; завод- изготовитель	Интенсивность отказов $\lambda$ , откл./год	Интенсивность отказов расчетная $\lambda^*$ , откл./год
T <sub>1</sub>	ТМ-1600/10/0,4; "Элтехком" <sup>3</sup> , (г. Нижний Новгород)	0,015	L <sub>1</sub>	АВВГ-0,4 кВ сечением S = 4–16 мм, "Эксперт-кабель" <sup>4</sup> (гг. Орел, Москва, Екатеринбург)	0,026	0,0026*
T <sub>2</sub>		0,015	L <sub>2</sub>		0,026	0,0026*
AB <sub>1</sub>	ВА51-39, КЭАЗ <sup>5</sup>	0,051	L <sub>3</sub>		0,026	0,0013*
AB <sub>2</sub>		0,051	L <sub>4</sub>		0,026	0,0013*
AB <sub>3</sub>		0,051	L <sub>5</sub>		0,026	0,0013*
AB <sub>4</sub>		0,051	L <sub>6</sub>		0,026	0,0013*
AB <sub>5</sub>		0,051	L <sub>7</sub>		0,026	0,0013*
AB <sub>6</sub>		0,051	L <sub>8</sub>		0,026	0,0013*
AB <sub>7</sub>		0,051	L <sub>9</sub>		0,026	0,0013*
AB <sub>8</sub>	ВА51-35, КЭАЗ	0,051	L <sub>10</sub>		0,026	0,0013*
AB <sub>9</sub>		0,051	L <sub>11</sub>		0,026	0,0013*
AB <sub>10</sub>		0,051	ПМ <sub>1</sub>	0,095	–	
AB <sub>11</sub>		0,051	ПМ <sub>2</sub>	0,095	–	
AB <sub>12</sub>		0,051	ПМ <sub>3</sub>	0,095	–	
AB <sub>13</sub>		0,051	ПМ <sub>4</sub>	0,095	–	
AB <sub>14</sub>		РЕ19-37, КЭАЗ	0,051	K <sub>1</sub>	0,098	–
AB <sub>15</sub>	0,051		K <sub>2</sub>	0,098	–	
P	0,038		K <sub>3</sub>	0,098	–	
ШРС	ШРС-1, "Абсолют- энерго" <sup>6</sup> (г. Пермь)	0,001	K <sub>4</sub>	КТ-6000, КЭАЗ	0,098	–
ПРС	ПР-11, "Абсолют- энерго"	0,001	K <sub>5</sub>		0,098	–

<sup>2</sup> ГОСТ 12434-83. Межгосударственный стандарт. Аппараты коммутационные низковольтные. Общие технические условия. Введен 01.01.1985. URL : <https://docs.cntd.ru/document/1200012546>.

<sup>3</sup> Каталог продукции компании "Элтехком". URL: <https://eltexkom.com/silovye-transformatory/> (Дата обращения: 20.09.2023.).

<sup>4</sup> Каталог кабельно-проводниковой продукции "Эксперт-кабель". URL: <https://expert-cable.ru/catalog/> (Дата обращения: 20.09.2023.).

<sup>5</sup> Каталог электротехнической продукции КЭАЗ. URL: <https://keaz.ru/catalog> (Дата обращения: 10.08.2023.).

<sup>6</sup> Каталог электротехнической продукции ООО "Абсолют-энерго". URL: <https://absolutnrg.ru/catalog/elektrochit/nickovol.html> (Дата обращения: 20.09.2023.).

Интенсивность отказов кабельной линии АВВГ-0,4 кВ зависит от ее длины и рассчитывается исходя из 100 м:

- для Л<sub>1</sub>, Л<sub>2</sub>:  $\lambda^* = 0,026 \cdot (10 \text{ м}/100 \text{ м}) = 0,0026 \text{ откл./год}$ ;
- для Л<sub>3</sub>... Л<sub>11</sub>:  $\lambda^* = 0,026 \cdot (5 \text{ м}/100 \text{ м}) = 0,0013 \text{ откл./год}$ .

Составим структурную схему надежности участка цеховой сети (рис. 2).

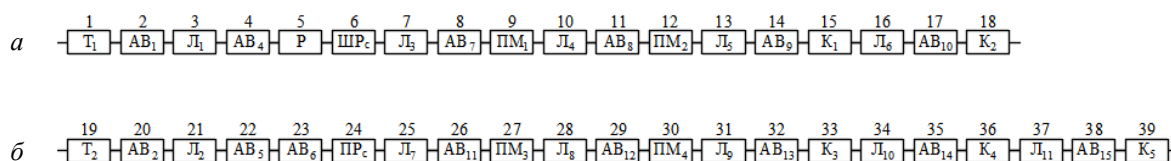


Рис. 2. Структурная схема надежности относительно ШРс (а) и ПРс (б)  
Fig. 2. Reliability structure diagram with respect to a) SHRs, б) PRs

### Результаты и обсуждение

Интенсивность отказов схемы системы внутризаводского электроснабжения определяется суммой интенсивностей отказов каждого элемента (*Конюхова и др., 2001*):

$$\lambda_c = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_n + \lambda_{л1} + \lambda_{л2} + \lambda_{л3} + \dots + \lambda_{лm}, \quad (1)$$

где  $\lambda_c$  – интенсивность отказов схемы;  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$  – интенсивности отказов элементов схемы;  $\lambda_{л1}, \lambda_{л2}, \lambda_{л3}, \dots, \lambda_{лm}$  – интенсивности отказов кабельных линий.

### Метод расчета относительно ШРс и ПРс

Интенсивность отказов схемы вычислим следующим образом:

– относительно ШРс:

$$\begin{aligned} \lambda_{C1} &= \lambda_{T1} + \lambda_{AB1} + \lambda_{Л1} + \lambda_{AB4} + \lambda_P + \lambda_{ШРс} + \lambda_{Л3} + \lambda_{AB7} + \lambda_{ПМ1} + \\ &+ \lambda_{Л4} + \lambda_{AB8} + \lambda_{ПМ2} + \lambda_{Л5} + \lambda_{AB9} + \lambda_{K1} + \lambda_{Л6} + \lambda_{AB10} + \lambda_{K2} = \\ &= \lambda_T + 6\lambda_{AB} + 5\lambda_{Л} + \lambda_P + \lambda_{ШРс} + 2\lambda_{ПМ} + 2\lambda_K; \end{aligned}$$

– относительно ПРс:

$$\begin{aligned} \lambda_{C2} &= \lambda_{T2} + \lambda_{AB2} + \lambda_{Л2} + \lambda_{AB5} + \lambda_{AB6} + \lambda_{ПРс} + \lambda_{Л7} + \lambda_{AB11} + \lambda_{ПМ3} + \\ &+ \lambda_{Л8} + \lambda_{AB12} + \lambda_{ПМ4} + \lambda_{Л9} + \lambda_{AB13} + \lambda_{K3} + \lambda_{Л10} + \lambda_{AB14} + \lambda_{K4} + \\ &+ \lambda_{Л11} + \lambda_{AB15} + \lambda_{K5} = \lambda_T + 8\lambda_{AB} + \lambda_{ПРс} + 6\lambda_{Л} + 2\lambda_{ПМ} + 3\lambda_K. \end{aligned}$$

В табл. 2 приведены интенсивности отказов структурных схем относительно ШРс и ПРс.

Таблица 2. Данные для расчета параметров надежности схемы относительно ШРс и ПРс  
Table 2. Data for calculating the scheme reliability parameters with respect to DCp and DPp

Схема относительно ШРс			Схема относительно ПРс		
Номер элемента схемы	Элемент схемы	Интенсивность отказов $\lambda$ , откл./год	Номер элемента схемы	Элемент схемы	Интенсивность отказов $\lambda$ , откл./год
1	T <sub>1</sub>	0,015	19	T <sub>2</sub>	0,015
2	AB <sub>1</sub>	0,051	20	AB <sub>2</sub>	0,051
3	Л <sub>1</sub>	0,0026	21	Л <sub>2</sub>	0,0026
4	AB <sub>4</sub>	0,051	22	AB <sub>5</sub>	0,051
5	P	0,038	23	AB <sub>6</sub>	0,051
6	ШРс	0,001	24	ПРс	0,001
7	Л <sub>3</sub>	0,0013	25	Л <sub>7</sub>	0,0013
8	AB <sub>7</sub>	0,051	26	AB <sub>11</sub>	0,051
9	ПМ <sub>1</sub>	0,095	27	ПМ <sub>3</sub>	0,095
10	Л <sub>4</sub>	0,0013	28	Л <sub>8</sub>	0,0013
11	AB <sub>8</sub>	0,051	29	AB <sub>12</sub>	0,051
12	ПМ <sub>2</sub>	0,095	30	ПМ <sub>4</sub>	0,095
13	Л <sub>5</sub>	0,0013	31	Л <sub>9</sub>	0,0013
14	AB <sub>9</sub>	0,051	32	AB <sub>13</sub>	0,051
15	K <sub>1</sub>	0,098	33	K <sub>3</sub>	0,098

16	Л <sub>6</sub>	0,0013	34	Л <sub>10</sub>	0,0013
17	АВ <sub>10</sub>	0,051	35	АВ <sub>14</sub>	0,051
18	К <sub>2</sub>	0,098	36	К <sub>4</sub>	0,098
Сумма интенсивностей λ <sub>с1</sub>	0,7538		37	Л <sub>11</sub>	0,0013
			38	АВ <sub>15</sub>	0,051
			39	К <sub>5</sub>	0,098
			Сумма интенсивностей λ <sub>с2</sub>		0,9171

Для определения изменения значений функций вероятности безотказной работы и вероятности отказа во времени применим метод "свертки":

– для схемы относительно ШРс:

$$P_1(t) = e^{-\lambda_{с1}t} = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_{18})t}, \quad (2)$$

$$Q_1(t) = 1 - e^{-\lambda_{с1}t} = 1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_{18})t}, \quad (3)$$

где  $P_1(t)$  – вероятность безотказной работы во времени;  $Q_1(t)$  – вероятность появления отказа;  $\lambda_{с1}$  – сумма интенсивностей отказов схемы относительно ШРс;  $t$  – время наблюдения, равное 6 годам;

– для схемы относительно ПРс за первый год эксплуатации:

$$P_1(t=1) = e^{-0,7538 \cdot 1} = 0,471,$$

$$Q_1(t=1) = 1 - e^{-0,7538 \cdot 1} = 1 - 0,471 = 0,529.$$

Расчет относительно ПРс произведем аналогично по выражениям (2)–(3). Результаты расчетов параметров надежности на заданном интервале эксплуатации по годам представлены в табл. 3.

Таблица 3. Прогнозирование показателей надежности схем относительно ШРс и ПРс на период 6 лет  
Table 3. Forecasting of schemes' reliability indicators in relation to DCp and DPP for the period of 6 years

Схема относительно ШРс	Σλ	Год эксплуатации схемы					
		1	2	3	4	5	6
Вероятность безотказной работы в течение времени $P_1(t)$	0,7538	0,471	0,221	0,104	0,049	0,023	0,011
Вероятность появления отказа $Q_1(t)$		0,529	0,779	0,896	0,951	0,977	0,989
Схема относительно ПРс	Σλ	Год эксплуатации схемы					
		1	2	3	4	5	6
Вероятность безотказной работы в течение времени $P_2(t)$	0,9171	0,400	0,160	0,064	0,026	0,010	0,004
Вероятность появления отказа $Q_2(t)$		0,600	0,840	0,936	0,974	0,990	0,996

Оценим периодичность технического обслуживания (ТО) в соответствии с условием

$$P(t) = P_{\text{доп}} \quad (4)$$

Данные, указанные в табл. 3, свидетельствуют о том, что критерий (4) нарушается в первый год эксплуатации, тогда

$$P_{\text{доп}} > P(1),$$

для схемы относительно ШРс:  $0,85 > 0,471$ ,

для схемы относительно ПРс:  $0,85 > 0,400$ .

Поэтому  $t_{\text{доп}} = 1$  и ТО должно быть ежегодным, что удовлетворяет требованиям ГОСТ 30852.16-2002 о проведении ТО не реже одного раза в течение 12 месяцев<sup>7</sup>.

По данным табл. 3 построим графики изменения функции вероятности безотказной работы и вероятности появления отказа во времени для схем относительно ШРс и ПРс (рис. 3).

На рис. 3 вероятности безотказной работы и появления отказа во времени для схемы относительно ШРс обозначены  $P_1(t)$ ,  $Q_1(t)$ ; для схемы относительно ПРс –  $P_2(t)$ ,  $Q_2(t)$ .

Графики показывают (рис. 3), что вероятности времени безотказной работы для схем относительно ШРс и ПРс отличаются в первый год эксплуатации на 17,75 %, во второй – на 38,13 %, в третий – на 62,5 % (что объясняется снижением уровня надежности схемы) и начиная с четвертого года практически равны нулю. Исследуемые характеристики соответствуют экспоненциальному закону распределения параметров надежности.

<sup>7</sup> ГОСТ 30852.16-2002 (МЭК 60079-17:1996). Межгосударственный стандарт. Электрооборудование взрывозащищенное. Введен 15.02.2014. URL : <https://docs.cntd.ru/document/1200103399>.

Данный метод оценки параметров рекомендуется применять для уточнения периодичности технического обслуживания и ремонта электрооборудования в системе внутривзаводского электроснабжения (Ivanova et al., 2022; Gasparyan et al., 2018; Shenggang et al., 2019).

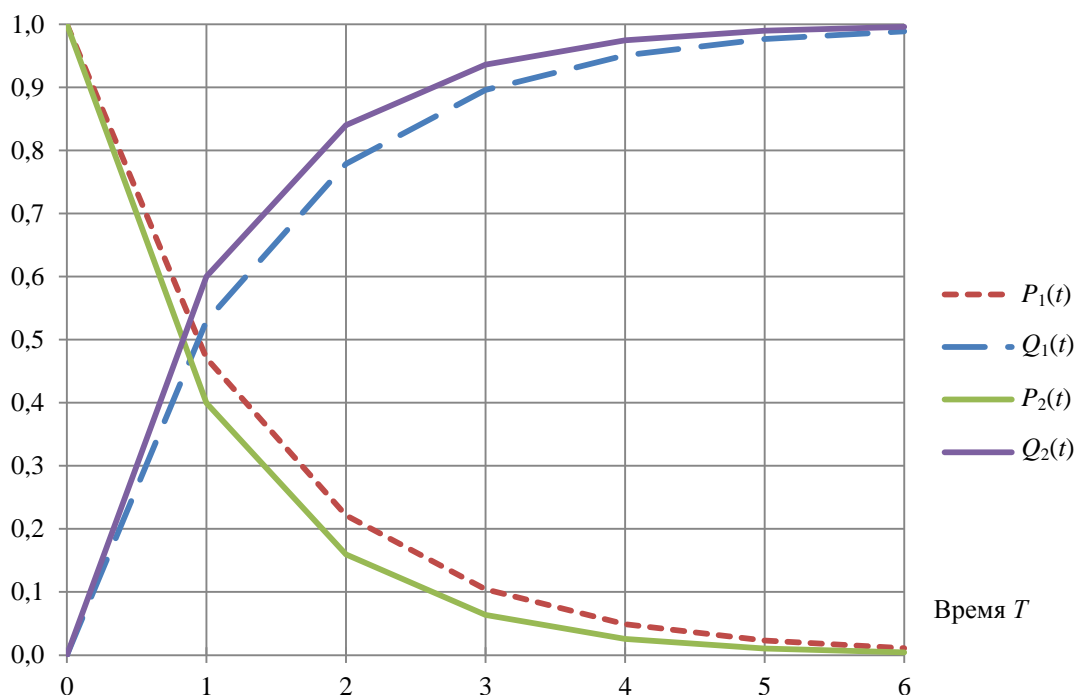


Рис. 3. Графики изменения функций вероятности безотказной работы и появления отказа во времени  
 Fig. 3. Graphs of changing functions of failure-free operation probability and failure occurrence in time

*Метод расчета относительно каждого присоединения ШРС и ПРС*

Рассмотрим метод оценки параметров надежности схем относительно каждого присоединения ШРС и ПРС.

На рис. 4 показаны расчетные схемы надежности относительно каждого присоединения ШРС.

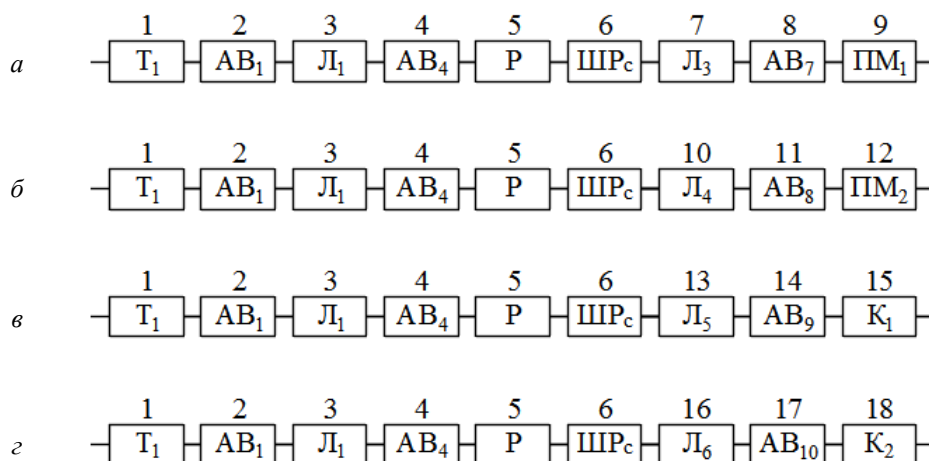


Рис. 4. Расчетные схемы надежности относительно первого (а), второго (б), третьего (в), четвертого (г) присоединений ШРС

Fig. 4. Calculated reliability diagrams for (a) the first, (б) the second, (в) the third, and (г) the fourth connections of DCp

Рассчитаем интенсивности отказов схемы относительно каждого присоединения, используя данные табл. 1:

– для первого присоединения:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \lambda_{T1} + \lambda_{AB1} + \lambda_{Л1} + \lambda_{AB4} + \lambda_P + \lambda_{ШРс} + \lambda_{Л3} + \lambda_{AB7} + \lambda_{ПМ1} = \\ &= \lambda_T + 3\lambda_{AB} + 2\lambda_{Л} + \lambda_P + \lambda_{ШРс} + \lambda_{ПМ} = \\ &= 0,015 + 3 \cdot 0,051 + 2 \cdot 0,026 + 0,038 + 0,001 + 0,095 = 0,354; \end{aligned}$$

– второго присоединения:

$$\begin{aligned} \lambda_2 &= \lambda_{T1} + \lambda_{AB1} + \lambda_{Л1} + \lambda_{AB4} + \lambda_P + \lambda_{ШРс} + \lambda_{Л4} + \lambda_{AB8} + \lambda_{ПМ2} = \\ &= \lambda_T + 3\lambda_{AB} + 2\lambda_{Л} + \lambda_P + \lambda_{ШРс} + \lambda_{ПМ} = \\ &= 0,015 + 3 \cdot 0,051 + 2 \cdot 0,026 + 0,038 + 0,001 + 0,095 = 0,354; \end{aligned}$$

– третьего присоединения:

$$\begin{aligned} \lambda_3 &= \lambda_{T1} + \lambda_{AB1} + \lambda_{Л1} + \lambda_{AB4} + \lambda_P + \lambda_{ШРс} + \lambda_{Л5} + \lambda_{AB9} + \lambda_{К1} = \\ &= \lambda_T + 3\lambda_{AB} + 2\lambda_{Л} + \lambda_P + \lambda_{ШРс} + \lambda_{К} = \\ &= 0,015 + 3 \cdot 0,051 + 2 \cdot 0,026 + 0,038 + 0,001 + 0,098 = 0,357; \end{aligned}$$

– четвертого присоединения:

$$\begin{aligned} \lambda_4 &= \lambda_{T1} + \lambda_{AB1} + \lambda_{Л1} + \lambda_{AB4} + \lambda_P + \lambda_{ШРс} + \lambda_{Л6} + \lambda_{AB10} + \lambda_{К2} = \\ &= \lambda_T + 3\lambda_{AB} + 2\lambda_{Л} + \lambda_P + \lambda_{ШРс} + \lambda_{К} = \\ &= 0,015 + 3 \cdot 0,051 + 2 \cdot 0,026 + 0,038 + 0,001 + 0,098 = 0,357. \end{aligned}$$

Рассчитаем вероятности безотказной работы и появления отказа во времени:

$$P_{1,2}(t=1) = e^{-\lambda t} = e^{-0,354 \cdot 1} = 0,702,$$

$$Q_{1,2}(t=1) = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - e^{-0,354 \cdot 1} = 0,298.$$

Расчетные схемы надежности относительно каждого присоединения ПРс представлены на рис. 5.

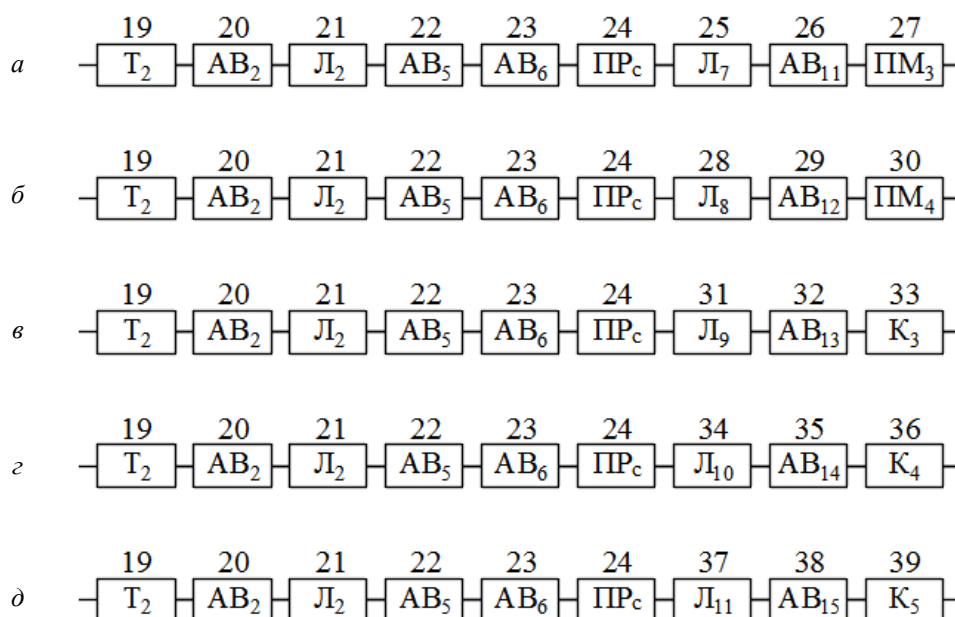


Рис. 5. Расчетные схемы надежности относительно пятого (а), шестого (б), седьмого (в), восьмого (г) и девятого (д) присоединений ПРс

Fig. 5. Calculated reliability diagrams for (a) the fifth, (б) the sixth, (в) the seventh, (г) the eighth, and (д) the ninth connections of DPp

Интенсивности отказов относительно каждого присоединения ПРс рассчитываются аналогично. Результаты расчетов схем относительно каждого присоединения ШРс и ПРс показаны в табл. 4.



Таблица 4. Результаты расчетов параметров схем относительно каждого присоединения ШРс и ПРс  
Table 4. Results of calculations of circuit parameters with respect to each connection of DCp and DPp

Номер присоединения	Присоединение относительно	Интенсивность отказов, откл./год	–	Год					
				1	2	3	4	5	6
1, 2	ШРс	0,354	$P_{1,2}(t)$	0,702	0,493	0,346	0,243	0,170	0,120
			$Q_{1,2}(t)$	0,298	0,507	0,654	0,757	0,830	0,880
3, 4		0,357	$P_{3,4}(t)$	0,700	0,490	0,343	0,240	0,168	0,117
			$Q_{3,4}(t)$	0,300	0,510	0,657	0,760	0,832	0,883
Номер присоединения	Присоединение относительно	Интенсивность отказов, откл./год	–	Год					
				1	2	3	4	5	6
5, 6	ПРс	0,367	$P_{5,6}(t)$	0,693	0,480	0,333	0,230	0,160	0,111
			$Q_{5,6}(t)$	0,307	0,520	0,667	0,770	0,840	0,889
7, 8, 9		0,37	$P_{7,8,9}(t)$	0,691	0,477	0,330	0,228	0,157	0,109
			$Q_{7,8,9}(t)$	0,309	0,523	0,670	0,772	0,843	0,891

На рис. 6 показаны графики изменения функций вероятности безотказной работы и появления отказа во времени относительно каждого присоединения ШРс и ПРс.

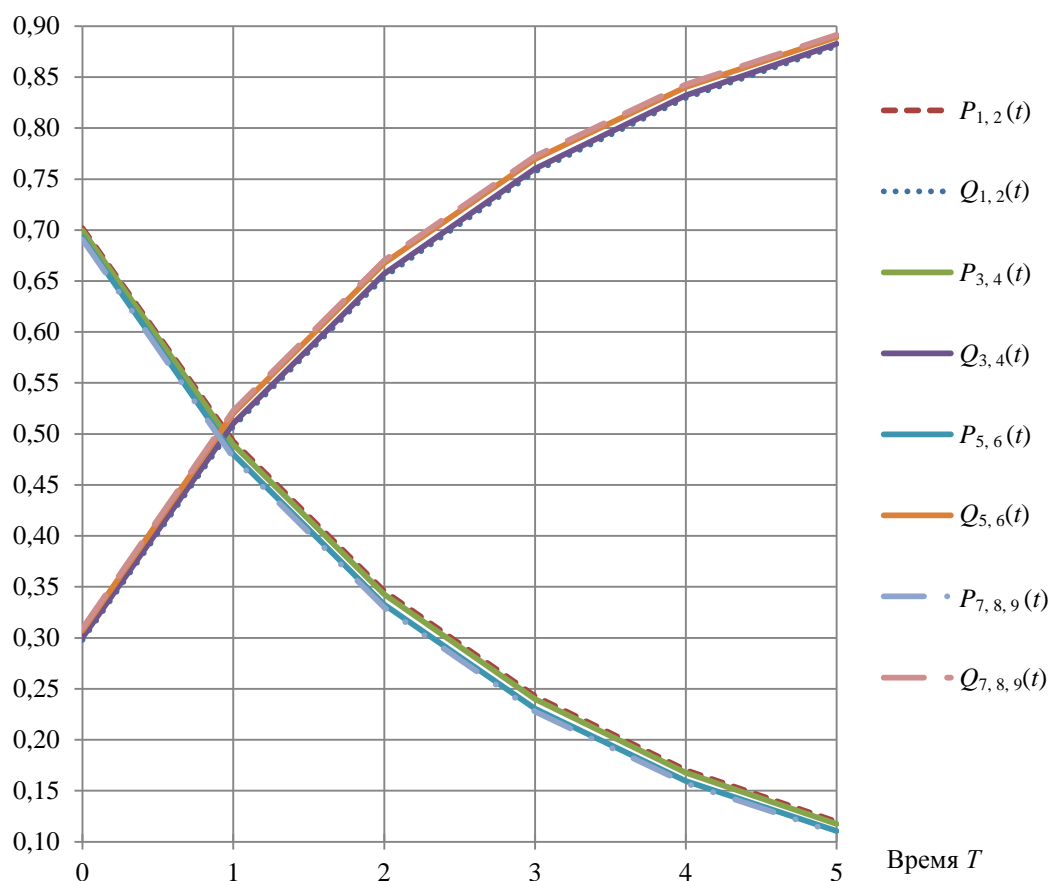


Рис. 6. Графики изменения функций вероятности безотказной работы и появления отказа во времени относительно каждого присоединения ШРс и ПРс  
Fig. 6. Graphs of change of functions of failure-free operation probability and occurrence of failure in time with respect to each connection of DCp and DPp

На основании результатов исследований (табл. 4, рис. 6) установлено, что функции вероятности безотказной работы и появления отказа во времени подчиняются экспоненциальному закону распределения параметров. Данный метод рекомендуется для оценки надежности схемы относительно каждого присоединения.

Логико-вероятностный метод расчета

Для расчетной схемы (рис. 1) определим частоту отключений первой и второй секций шин, построив дерево отказов относительно источников питания ШРС и ПРС и относительно каждого присоединения по отдельности (на примере первого и пятого присоединений) (рис. 7–10).

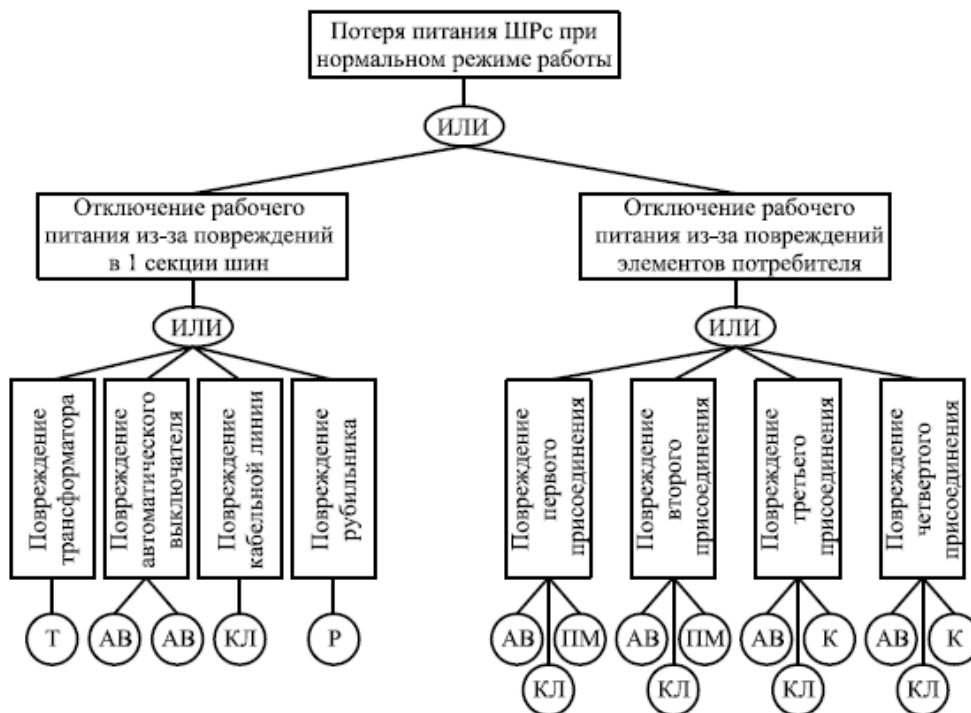


Рис. 7. Дерево отказов для оценки частоты потери питания ШРС  
 Fig. 7. Failure tree for estimating the frequency of power loss of DCp

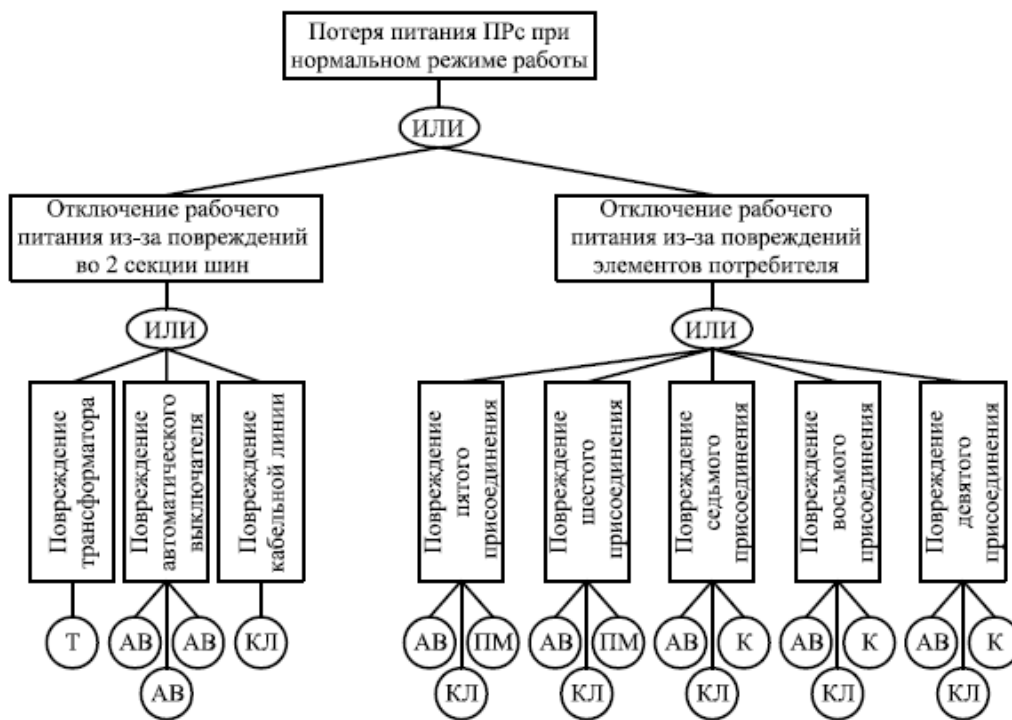


Рис. 8. Дерево отказов для оценки частоты потери питания ПРС  
 Fig. 8. Failure tree for estimating the frequency of power loss of DPr

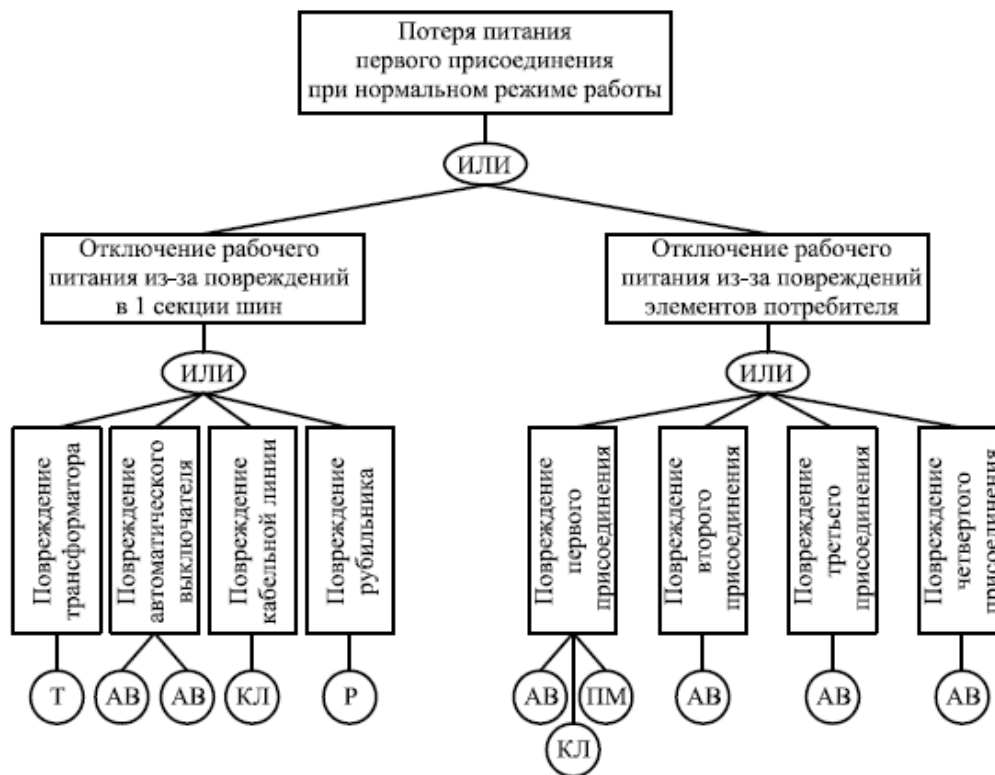


Рис. 9. Дерево отказов для оценки частоты потери питания первого присоединения ШРс  
 Fig. 9. Failure tree for estimating the frequency of loss of power supply to the first bay of DCp

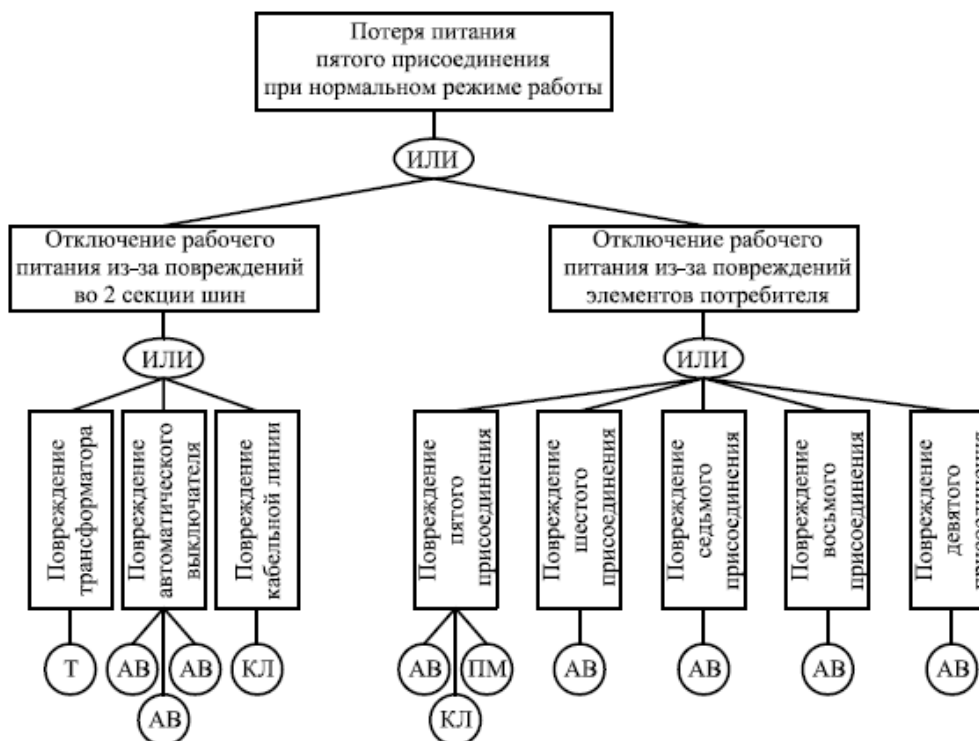


Рис. 10. Дерево отказов для оценки частоты потери питания пятого присоединения ПРс  
 Fig. 10. Failure tree for estimating the frequency of power loss of the fifth bay of DPp

Найдем функцию отказа при потере питания ШРс (рис. 7):

$$\begin{aligned} X(\text{ШРс}) &= [T + AB + AB + KЛ + P] + \left[ \begin{array}{l} (AB + KЛ + ПМ) + (AB + KЛ + ПМ) + \\ + (AB + KЛ + K) + (AB + KЛ + K) \end{array} \right] = \\ &= T + 2AB + KЛ + P + 2(AB + KЛ + ПМ) + 2(AB + KЛ + K) = \\ &= T + 6AB + 5KЛ + P + 2ПМ + 2K = \\ &= 0,015 + 6 \cdot 0,051 + 5 \cdot 0,026 + 0,038 + 2 \cdot 0,095 + 3 \cdot 0,098 = 0,973. \end{aligned}$$

Функцию отказа при потере питания ПРс (рис. 8) определим так:

$$\begin{aligned} X(\text{ПРс}) &= [T + AB + AB + AB + KЛ] + \left[ \begin{array}{l} (AB + KЛ + ПМ) + (AB + KЛ + ПМ) + \\ + (AB + KЛ + K) + (AB + KЛ + K) + (AB + KЛ + K) \end{array} \right] = \\ &= T + 3AB + KЛ + 2(AB + KЛ + ПМ) + 3(AB + KЛ + K) = \\ &= T + 8AB + 6KЛ + 2ПМ + 3K = \\ &= 0,015 + 8 \cdot 0,051 + 6 \cdot 0,026 + 2 \cdot 0,095 + 3 \cdot 0,098 = 1,063. \end{aligned}$$

Рассчитаем функцию отказа при потере питания первого присоединения ШРс (рис. 9):

$$\begin{aligned} X(1) &= [T + AB + AB + KЛ + P] + [(AB + KЛ + ПМ) + AB + AB + AB] = \\ &= T + 2AB + KЛ + P + AB + KЛ + ПМ + 3AB = \\ &= T + 6AB + 2KЛ + P + ПМ = \\ &= 0,015 + 6 \cdot 0,051 + 2 \cdot 0,026 + 0,038 + 0,095 = 0,506. \end{aligned}$$

Определим функцию отказа при потере питания пятого присоединения ПРс (рис. 10):

$$\begin{aligned} X(5) &= [T + AB + AB + AB + KЛ] + [(AB + KЛ + ПМ) + AB + AB + AB + AB] = \\ &= T + 3AB + KЛ + AB + KЛ + ПМ + 4AB = \\ &= T + 8AB + 2KЛ + ПМ = \\ &= 0,015 + 8 \cdot 0,051 + 2 \cdot 0,026 + 0,095 = 0,57. \end{aligned}$$

Сравним полученные значения результатов расчета функций отказа при потере питания ШРс и ПРс логико-вероятностным методом с результатами, полученными при использовании метода расчета относительно каждого присоединения распределительного шкафа и распределительного пункта.

Метод расчета относительно ШРс и ПРс предполагаем эталонным вариантом расчета, т. е. при его применении погрешность составляет 0 %.

Оценим погрешность полученных результатов по формуле

$$\delta = \left( \frac{X_{\text{расч}} - X_{\text{эталон}}}{X_{\text{эталон}}} \right) \cdot 100 \%, \quad (5)$$

где  $X_{\text{расч}}$  – проверяемое значение;  $X_{\text{эталон}}$  – эталонное значение.

При использовании логико-вероятностного метода:

1) погрешность относительно ШРс составляет

$$\delta = \frac{0,973 - 0,7538}{0,7538} \cdot 100 \% = 29,07 \%;$$

2) погрешность относительно ПРс равна

$$\delta = \frac{1,063 - 0,9171}{0,9171} \cdot 100 \% = 15,91 \%.$$

Таким образом, логико-вероятностный метод является менее достоверным, так как при его использовании возможно получение завышенных значений интенсивности отказов  $\lambda$  и результатов расчетов погрешности (на 29 и 16 % относительно ШРс и ПРс соответственно).

## Заключение

В результате проведенных исследований выполнен анализ основных характеристик надежности низковольтного электрооборудования. Рассмотренные методы анализа могут быть использованы для оценки надежности схемы низковольтной сети.

Метод расчета относительно ШРс и ПРс рекомендуется применять для уточнения периодичности и сроков проведения ТО и ремонтов электрооборудования в системе внутризаводского электроснабжения.

Метод расчета относительно присоединений ШРс и ПРс целесообразно применять для анализа надежности участков схемы сети.

Результаты расчетов параметров надежности схемы при использовании логико-вероятностного метода (дерево отказов) могут применяться для оценки частоты потери питания как ШРс и ПРс, так и каждого присоединения в отдельности.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Библиографический список

- Виноградов А. В., Перьков Р. А. Анализ повреждаемости электрооборудования электрических сетей и обоснование мероприятий по повышению надежности электроснабжения потребителей // Вестник НГИЭИ. 2015. № 12(55). С. 12–21. EDN: VNJVXX.
- Грачева Е. И., Садыков Р. Р., Хуснутдинов Р. Р., Абдуллазянов Р. Э. Исследование параметров надежности низковольтных коммутационных аппаратов по эксплуатационным данным промышленных предприятий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019а. Т. 21, № 1–2. С. 10–18. DOI: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-10-18>. EDN: WCWLKE.
- Грачева Е. И., Садыков Р. Р., Хуснутдинов Р. Р., Алимова А. Н. Надежность и компоновка низковольтных распределительных устройств внутрицехового электроснабжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019б. Т. 11, № 1(41). С. 3–9. EDN: HVYFHO.
- 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). С. 27–33. EDN: QUERVT.
- Зацепина В. И., Астанин С. С. Анализ надежности системы электроснабжения с учетом отказоустойчивости релейной защиты // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2020. Т. 26, № 4. С. 564–570. DOI: <https://doi.org/10.17277/vestnik.2020.04.pp.564-570>. EDN: LIPVUD.
- Конюхова Е. А. Исследование и анализ надежности схем при сравнении вариантов систем промышленного электроснабжения с двухтрансформаторными подстанциями // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2018. № 4(40). С. 66–76. EDN: FQSCHV.
- Конюхова Е. А., Киреева Э. А. Надежность электроснабжения промышленных предприятий. М. : Энергопрогресс : Энергетик, 2001. 91 с. (Библиотечка электротехника ; Вып. 12(36)).
- 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. DOI: [10.30724/1998-9903-2017-19-5-6-98-108](https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-5-6-98-108). EDN: ZIXFIF.
- Секретарев Ю. А., Горшунов А. А., Меняйкин Д. А. Моделирование технического состояния оборудования систем электроснабжения монопотребителей с учетом схемной надежности // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2022. Т. 18, № 3(69). С. 3–14. DOI: [https://doi.org/10.53015/18159958\\_2022\\_18\\_3\\_3](https://doi.org/10.53015/18159958_2022_18_3_3). EDN: YFYEFB.
- Шпиганович А. Н., Шпиганович А. А., Зацепин Е. П. К анализу безотказности электрических систем промышленных предприятий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 12. С. 59–63. EDN: YTEJZR.
- 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/gpecom58364.2023.10175821>.
- 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>.
- Petrov T. I., Safin A. R. Modification of the synchronous motor model for topological optimization // E3S Web of Conferences. High Speed Turbomachines and Electrical Drives Conference 2020 (HSTED-2020). 2020. Vol. 178. Article number: 01016. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017801016>.
- Shenggang X., Jin L., Jiale L., Rushan C. Research on reliability and working life assessment method of mechanical and electrical products in weapon equipment // 4th International Conference on System Reliability and Safety (ICSRs), Rome, Italy, 2019. P. 364–368. DOI: <https://doi.org/10.1109/icsrs48664.2019.8987718>.
- 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

- Vinogradov, A. V., Perkov, R. A. 2015. Analysis of electrical equipment damageability of electrical networks and justification of measures to improve the reliability of power supply to consumers. *Bulletin NGIEI*, 12(55), pp. 12–21. EDN: VHJBXX. (In Russ.)
- Gracheva, E. I., Sadykov, R. R., Khusnutdinov, R. R., Abdullazianov, R. E. 2019a. Investigation of reliability parameters of low-voltage switching devices according to operational data of industrial enterprises. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, 21(1–2), pp. 10–18. DOI: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-10-18>. EDN: WCWLKE. (In Russ.)
- Gracheva, E. I., Sadykov, R. R., Khusnutdinov, R. R., Alimova, A. N. 2019b. Reliability and component of low-voltage displaying devices of internal electrical supply. *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo Universiteta*, 11(1(41)), pp. 3–9. EDN: HVYFHO. (In Russ.)
- Gracheva, E. I., Naumov, O. V., Shakurova, Z. M. 2018. Information parametric characteristics of the reliability of low-voltage switching devices of industrial complexes. *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo Universiteta*, 3(39), pp. 27–33. 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. *Vestnik Tambovskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta*, 26(4), pp. 564–570. DOI: <https://doi.org/10.17277/vestnik.2020.04.pp.564-570>. EDN: LIPVUD. (In Russ.)
- Konyukhova, E. A. 2018. Research and analysis of the reliability of schemes when comparing options of industrial electrical supply systems with double-transformator substations. *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo Universiteta*, 4(40), pp. 66–76. EDN: FQSCHV. (In Russ.)
- Konyukhova, E. A., Kireeva, E. A. 2001. Reliability of power supply of industrial enterprises. Moscow. (In Russ.)
- Petrova, R. M., Abdullazyanov, E. Yu., Grachieva, E. I., Valtchev, S. et al. 2023. Study of probability characteristics of reliability of electrical equipment in internal power supply systems. *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo 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. DOI: [10.30724/1998-9903-2017-19-5-6-98-108](https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-5-6-98-108). EDN: ZIXFIF. (In Russ.)
- Secretarev, Yu. A., Gorshunov, A. A., Menyaykin, D. A. 2022. Modeling of the technical state of the equipment of the power supply systems of the mono-consumers taking into account the circuit reliability. *Vesti Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Chernozem'ya*, 18(3(69)), pp. 3–14. DOI: [https://doi.org/10.53015/18159958\\_2022\\_18\\_3\\_3](https://doi.org/10.53015/18159958_2022_18_3_3). EDN: YFYEFB. (In Russ.)
- Shpiganovich, A. N., Shpiganovich, A. A., Zatsepin, E. P. 2018. To the analysis of the failure-free operation of the electrical systems of the industrial enterprises. *Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*, 12, pp. 59–63. EDN: YTEJZR. (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/gpecom58364.2023.10175821>.
- 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>.
- Petrov, T. I., Safin, A. R. 2020. Modification of the synchronous motor model for topological optimization. E3S Web of Conferences. High Speed Turbomachines and Electrical Drives Conference 2020 (HSTED-2020). Vol. 178. Article number: 01016. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017801016>.
- Shenggang, X., Jin, L., Jiale, L., Rushan, C. 2019. Research on reliability and working life assessment method of mechanical and electrical products in weapon equipment. 4th International Conference on System Reliability and Safety (ICSRS), Rome, Italy, pp. 364–368. DOI: <https://doi.org/10.1109/icsrs48664.2019.8987718>.
- 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, PhD 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>

**Валтчев Станимир** – Лиссабон, Португалия; Университет NOVA в Лиссабоне, профессор;  
e-mail: ssv@fct.unl.pt

**Stanimir Valtchev** – Lisbon, Portugal; University NOVA of Lisbon, Professor; e-mail: ssv@fct.unl.pt

**Мифтахова Наиля Камильевна** – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066;  
Казанский государственный энергетический университет, ст. преподаватель;  
e-mail: nailya\_miftahovna@mail.ru

**Nailya K. Miftakhova** – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066;  
Kazan State Power Engineering University, Senior Lecturer;  
e-mail: nailya\_miftahovna@mail.ru