



Оценка параметров надежности схем цехового электроснабжения горных предприятий с однотрансформаторными подстанциями при различных способах их резервирования

Р.М.Петрова✉, Е.И.Грачева

Казанский государственный энергетический университет, Казань, Республика Татарстан, Россия

Как цитировать эту статью: Петрова Р.М., Грачева Е.И. Оценка параметров надежности схем цехового электроснабжения горных предприятий с однотрансформаторными подстанциями при различных способах их резервирования // Записки Горного института. 2026. Т. 277. С. 81-93. [EDN XZHFWA](#)

Аннотация

С усложнением электротехнического оборудования горных предприятий актуализируются разработка и исследование способов повышения надежности технических устройств, входящих в систему электроснабжения. Статья посвящена оценке параметров надежности схем участков цеховых сетей горных предприятий с однотрансформаторными подстанциями 10 и 0,4 кВ и различными способами их резервирования. Цель исследования – проведение оценки параметров надежности различных способов резервирования схем электроснабжения объектов с трансформаторными подстанциями на среднем и низком напряжении (СН и НН) относительно электропотребителей распределительного устройства низкого напряжения горно-добывающих предприятий. Объектом исследования является система электроснабжения цеха вспомогательного производства горнодобывающего предприятия (Кемерово). В работе исследуются параметры надежности участков сети – вероятность безотказной (исправной) работы $P(t)$, вероятность появления отказа $Q(t)$, параметр потока отказов $\lambda_{\text{схемы}}$ и время наработки на отказ $T_{\text{нар.отк}}$ для следующих вариантов схем: без резервирования; с резервированием на СН; с резервированием на НН; с двойным резервированием (на СН и НН). Данные расчетов показывают, что время наработки на отказ для схемы без резервирования в 2,04 и в 2,11 раз меньше, чем для схем с резервированием на НН и на СН соответственно, и в 2,8 раз меньше, чем для схемы с двойным резервированием. Резервирование является технически и экономически обоснованным методом повышения параметра $P(t)$ системы электроснабжения объекта. Полученные результаты могут быть интегрированы в проектирование систем электроснабжения объектов (для оптимизации структурной схемы и выбора рационального способа резервирования элементов); разработку программ технического обслуживания (для формирования обоснованных регламентов технического обслуживания и ремонтов); создание систем мониторинга надежности (для организации непрерывного контроля текущего состояния оборудования цехов горных предприятий).

Ключевые слова

горное предприятие; цех; петлевая схема; кольцевая схема; логическая схема надежности; параметр потока отказов; время наработки на отказ; резервирование; двойное резервирование

Поступила: 31.01.2025

Принята: 02.07.2025

Онлайн: 23.12.2025

Опубликована: 27.02.2026

Введение

С усложнением технологического и электротехнического оборудования горных предприятий актуальными вопросами становятся разработка и исследование способов повышения надежности технических устройств, входящих в систему электроснабжения (СЭС). Оценка надежности работы оборудования СЭС может проводиться как на ранних этапах (проектирование, реконструкция), так и после ввода оборудования в эксплуатацию [1-3]. Необходимым условием для получения достоверных результатов расчета параметров надежности является соблюдение соответствия методической и информационной погрешностей [4]. Известно, что элементы электрооборудования СЭС цехов горных предприятий могут быть как восстанавливаемыми после отказа, так и невозстанавливаемыми [5].



Обеспечение надежности и безотказности работы электроустановок достигается при соблюдении регламентированных условий хранения, нормальных режимов эксплуатации, а также требований технического обслуживания и ремонта [6, 7].

Актуальность проблемы обусловлена постоянным ростом электропотребления горно-промышленных предприятий и усложнением структурно-топологических характеристик СЭС, что проявляется в увеличении количества элементов схемы и усложнении функциональных взаимосвязей между ними. Это создает предпосылки для разработки новых методик расчета надежности сложных многосвязанных систем [8, 9]. В частности, исследование [10] посвящено анализу основных параметров надежности и технико-экономических показателей электрооборудования промышленных объектов Казани.

Методические основы анализа надежности электротехнических комплексов применительно к узлам нагрузки включают разработку алгоритмов определения вероятностей возникновения отказов и безотказного функционирования системы [11-13]. С усложнением структурных взаимосвязей между элементами традиционные методы преобразования расчетных схем в последовательно-параллельные или параллельно-последовательные конфигурации становятся неприменимыми [14-16].

Определенные особенности характерны для схем типов «мостик» [17] и «двойной мостик», для которых не действуют правила преобразования последовательно-параллельных или параллельно-последовательных схем надежности. Для таких случаев требуется применение специальных методов анализа, включая логико-вероятностные методы, теорию графов и матричные методы расчета, численное моделирование методом Монте-Карло [18, 19]. Перспективным направлением является разработка комбинированных алгоритмов, сочетающих аналитические подходы и математическое моделирование, что особенно актуально для сложных многоуровневых СЭС горно-добывающих предприятий.

Развитие оборудования электрических систем требует повышения надежности электрооборудования и СЭС в целом [20], что достигается совершенствованием методов проектирования с использованием программных комплексов, а также разработкой новых видов электроустановок. Исследование причин отказов и дефектов низковольтной аппаратуры горно-добывающих предприятий показывает, что ~ 40-45 % общего количества отказов происходит от ошибок, допущенных при проектировании, 20 % от ошибок при производстве, 30 % от тяжелых условий эксплуатации и недопустимых режимов работы или неправильного обслуживания, ~ 5-7 % от естественного износа и старения оборудования [9, 21].

Приводятся методы оценки параметров надежности однотрансформаторных подстанций: разработка модели системы с учетом согласования экономических показателей и характеристик отказов [22, 23]; метод оценки надежности электроснабжения потребителей, позволяющий управлять качеством электроэнергии на основе данных состояния оборудования сети [24]; метод количественной оценки рисков потери электропитания потребителей с использованием Байесовских сетей, на основе которого устанавливаются показатели, влияющие на надежность энергосистемы [25]; реализация автоматической блокировки распределительной сети по числу оптимизации узлов и исследование надежности электроснабжения распределительной сети по блокам [26]; создание комплексной модели управления надежностью для точного прогнозирования поведения энергосистемы [27]; оптимизация регламентов технического обслуживания СЭС с исследованием параметров надежности элементов распределительных сетей [28, 29]; статистический метод оценки надежности энергосистемы для учета условий работы с использованием моделирования Монте – Карло и формированием вероятностных моделей надежности [30, 31].

Энерго- и ресурсосбережение являются одними из приоритетных задач [32, 33] при управлении энергоемким горным производством. Мероприятия, способствующие повышению энергоэффективности и энергосбережения, внедряемые в СЭС горно-добывающих предприятий [34, 35], можно условно разделить по направлениям: электрические сети; электрический привод; контроль и учет электропотребления [36, 37].

Цель исследования заключается в проведении оценки параметров надежности различных способов резервирования схем в СЭС объектов с трансформаторными подстанциями (ТП) на среднем



и низком напряжении (СН и НН) относительно электропотребителей распределительного устройства низкого напряжения горно-добывающих предприятий [38-40]. Научная новизна предлагаемого метода заключается в разработке и построении логической схемы надежности с учетом элементов каждого вида оборудования, упрощении ее согласно теории надежности с обработкой статистических данных вероятностных характеристик каждого элемента, а также расчету суммарного параметра потока отказов и времени безотказной работы схемы, отличающегося от известных и учитывающего такие элементы схемы сети 0,4 кВ, как низковольтные коммутационные аппараты. Объектом исследования является СЭС цеха вспомогательного производства горно-добывающего предприятия (Кемерово).

Методы

Исследуются возможные виды электрических схем:

1. Без резервирования.
2. С резервированием на НН (с установкой резервной перемычки 0,4 кВ).
3. С резервированием на СН (с установкой разъединителей Рз), без резервирования на НН.
4. С двойным резервированием на СН и НН.

Результаты исследований по статистике отказов позволяют сделать вывод о соответствии параметров надежности схемы показательному закону распределения [5].

Основными показателями надежности элементов схемы СЭС являются:

- 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 $t, \Delta t$;

- вероятность безотказной (исправной) работы

$$P = e^{-\omega(t)};$$

- вероятность появления отказа

$$Q = 1 - P = 1 - e^{-\omega(t)};$$

- время наработки на отказ

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

Обсуждение результатов

Исследуются параметры надежности четырех возможных вариантов резервирования схем.

Схема участка сети без резервирования (рис.1, а). На рис.1, б, в представлена структурная схема надежности без резервирования и ее преобразование. Все элементы соединены последовательно, при этом отказ одного любого элемента приводит к потере работоспособности всей системы. Эффективность работы такой схемы зависит, во-первых, от начальных параметров состояния и, во-вторых, от вероятностной последовательности отказов элементов (узлов).

Параметр потока отказов для цепи ИП-нагрузка (рис.1, б, в) для участка схемы без резервирования:

$$\begin{aligned} \omega_{\text{без рез}} &= \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \dots + \omega_{20} = \omega_{B_1} + \omega_{L_1} + \omega_{T_1} + \omega_{AB_1} + \omega_{AB_2} + \omega_{L_2} + \omega_{AB_3} + \omega_{ШРс} + \omega_{AB_4} + \\ &+ \omega_{L_3} + \omega_{ПМ_1} + \omega_{AB_5} + \omega_{L_4} + \omega_{ПМ_2} + \omega_{AB_6} + \omega_{L_5} + \omega_{K_1} + \omega_{AB_7} + \omega_{L_6} + \omega_{K_2} = \\ &= \omega_B + \omega_{L_{10кВ}} + \omega_T + 7\omega_{AB} + 5\omega_{L_{0,4кВ}} + \omega_{ШРс} + 2\omega_{ПМ} + 2\omega_K. \end{aligned}$$

Параметр потока отказов кабельной линии $\omega_{L_{10кВ}}$ (СКЛ-10 кВ) зависит от ее длины и рассчитывается по удельному параметру на 1 км: $\omega_{L_1} = 0,01(100 \text{ м}/1000 \text{ м}) = 0,001 \text{ откл/год}$.

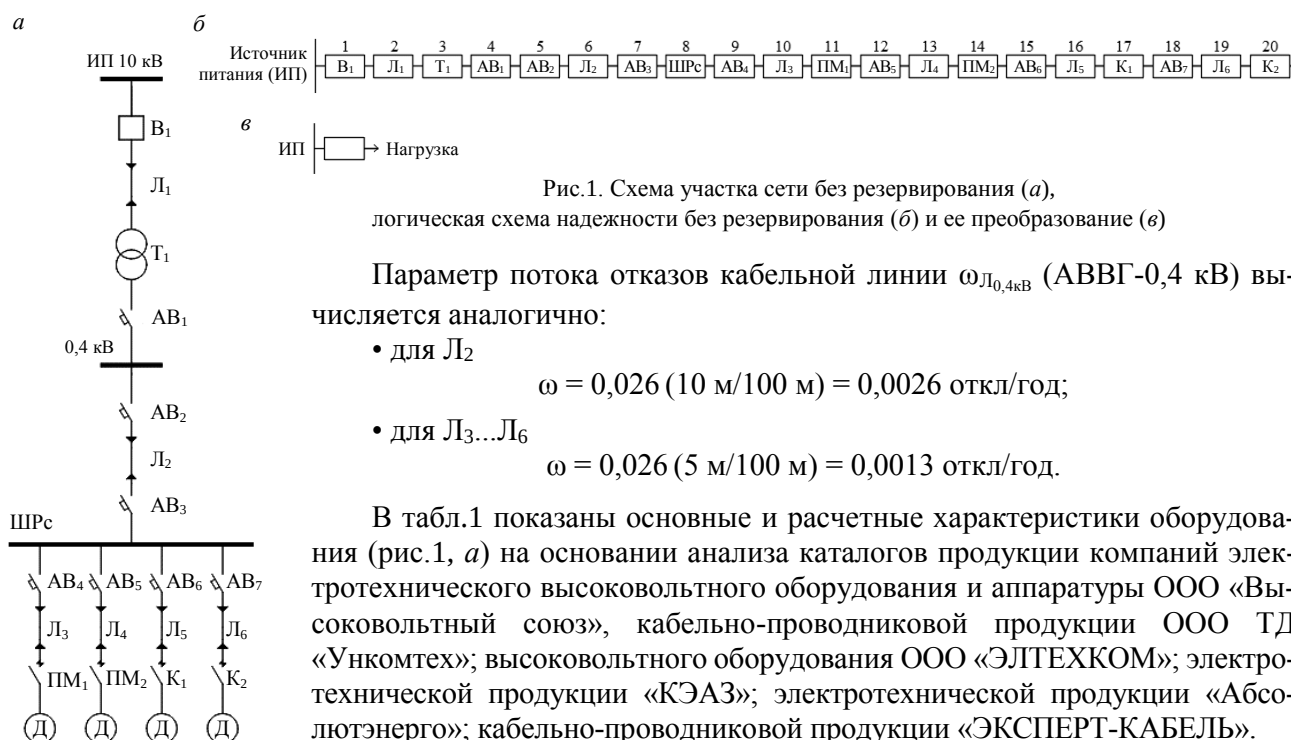


Рис.1. Схема участка сети без резервирования (а), логическая схема надежности без резервирования (б) и ее преобразование (в)

Параметр потока отказов кабельной линии $\omega_{Л0,4кВ}$ (АВВГ-0,4 кВ) вычисляется аналогично:

- для $Л_2$

$$\omega = 0,026 (10 \text{ м}/100 \text{ м}) = 0,0026 \text{ откл/год};$$

- для $Л_3...Л_6$

$$\omega = 0,026 (5 \text{ м}/100 \text{ м}) = 0,0013 \text{ откл/год}.$$

В табл.1 показаны основные и расчетные характеристики оборудования (рис.1, а) на основании анализа каталогов продукции компаний электротехнического высоковольтного оборудования и аппаратуры ООО «Высоковольтный союз», кабельно-проводниковой продукции ООО ТД «Ункомтех»; высоковольтного оборудования ООО «ЭЛТЕХКОМ»; электротехнической продукции «КЭАЗ»; электротехнической продукции «Абсолютэнерго»; кабельно-проводниковой продукции «ЭКСПЕРТ-КАБЕЛЬ».

Таблица 1

Технические характеристики оборудования и результаты расчета параметра потока отказов ω для элементов схемы

Элементы	Марка, производитель	ω , откл/год
В ₁	ВРС-10, ООО «Высоковольтный союз» ¹	0,015
Л ₁	СКЛ-10кВ, сечение 70 мм ² , длина 100 м, ООО ТД «Ункомтех» ²	0,001
Т ₁	ТМ-1600/10/0,4, ООО «ЭЛТЕХКОМ» ³	0,015
АВ ₁ , АВ ₂ , АВ ₃	ВА51-39, АО «Курский электроаппаратный завод» («КЭАЗ») ⁴	0,051
АВ ₄ , АВ ₅ , АВ ₆ , АВ ₇	ВА51-35, «КЭАЗ» ⁴	0,051
ШРС	ШРС-1, «Абсолютэнерго» ⁵	0,001
Л ₂	АВВГ-0,4 кВ, сечение 16 мм ² , длина 10 м, «ЭКСПЕРТ-КАБЕЛЬ» ⁶	0,026
Л ₃ , Л ₄ , Л ₅ , Л ₆	АВВГ-0,4 кВ, сечение 4 мм ² , длина 5 м, «ЭКСПЕРТ-КАБЕЛЬ» ⁶	0,0013
ПМ ₁ , ПМ ₂	ПМЛ-1100, «КЭАЗ» ⁴	0,095
К ₁ , К ₂	КТ-6000, «КЭАЗ» ⁴	0,098

Таким образом,

$$\omega_{\text{без рез}} = 0,015 + 0,01 + 0,015 + 7 \cdot 0,051 + (0,0026 + 4 \cdot 0,0013) + 0,001 + 2 \cdot 0,095 + 2 \cdot 0,098 = 0,7828;$$

$$T_{\text{нар.отк}} = \frac{1}{\omega} = \frac{1}{0,7828} = 1,2775.$$

Схема участка сети с резервированием на НН (с резервной перемычкой 0,4 кВ) (рис.2). Резервирование представляет способ увеличения надежности работы электроустановок, основанный на замене отказавшего изделия резервным. Основные методы резервирования:

- Поэлементное (компонентное) – резервирование отдельных компонентов системы (трансформаторов, выключателей, кабельных линий и т.д.).

¹ Каталог ООО «Высоковольтный союз». URL: <https://www.vsoyuz.com/> (дата обращения 31.01.2025).

² Каталог ООО «Торговый Дом «УНКОМТЕХ». URL: <https://www.uncomtech.ru/> (дата обращения 31.01.2025).

³ Каталог ООО «ЭЛТЕХКОМ». URL: <https://eltechkom.com/silovye-transformatory/> (дата обращения 31.01.2025).

⁴ Каталог КЭАЗ. URL: <https://keaz.ru/catalog> (дата обращения 31.01.2025).

⁵ Каталог ООО «Абсолютэнерго». URL: <https://absolutnrg.ru/catalog/elektrochit/nickovol.html> (дата обращения 31.01.2025).

⁶ Каталог «ЭКСПЕРТ-КАБЕЛЬ». URL: <https://expert-cable.ru/catalog/> (дата обращения 31.01.2025).

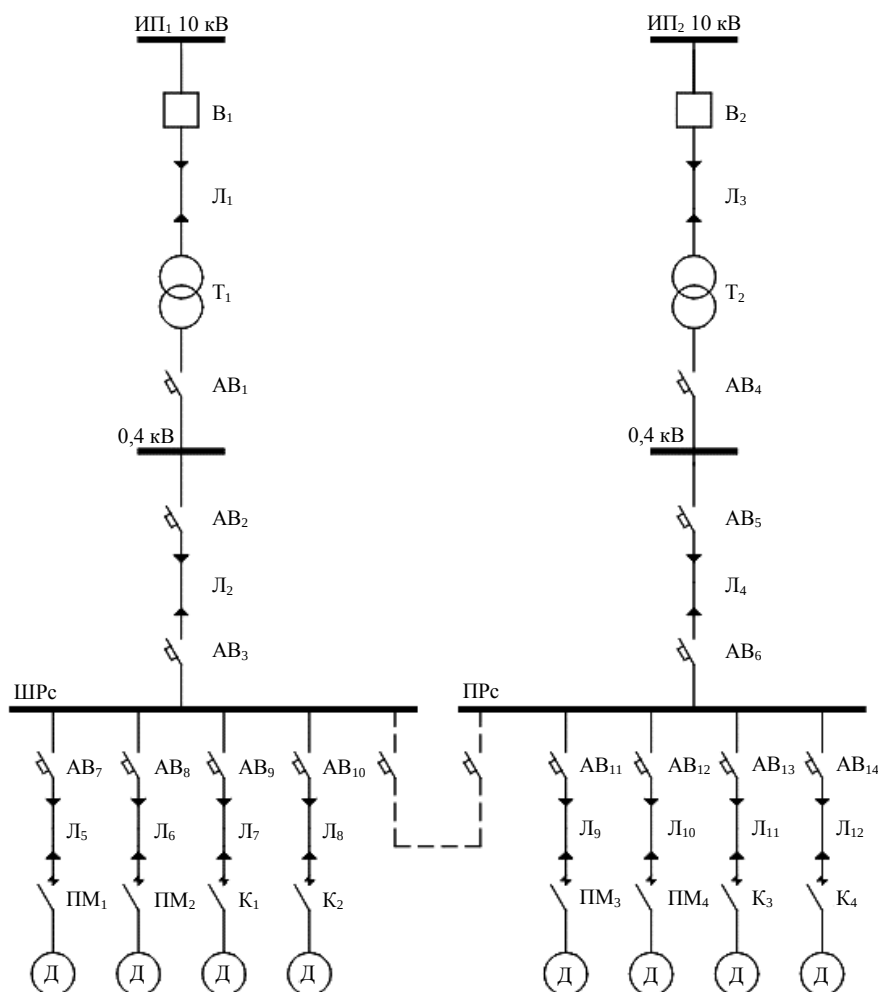


Рис.2. Схема участка сети с резервированием на НН

- Групповое (модульное) – резервирование функциональных групп оборудования (трансформатор, выключатель, кабельная линия).
- Общее (системное) – полное дублирование СЭС.

Для электрической схемы питания первой секции шин с установленной резервной переключкой (р/пер) на НН (рис.2) логическая схема надежности имеет две последовательные рабочие цепи, соединенные параллельно элементом р/пер (рис.3).

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

Параметр потока отказов цепи ИП₁-р/пер:

$$\begin{aligned}\omega_{\text{ИП}_1\text{-р/пер}} &= \omega_1 + \dots + \omega_8 = \omega_{B_1} + \omega_{L_1} + \omega_{T_1} + \omega_{AB_1} + \omega_{AB_2} + \omega_{L_2} + \omega_{AB_3} + \omega_{\text{ШРс}} = \\ &= 0,015 + 0,001 + 0,015 + 3 \cdot 0,051 + 0,0026 + 0,001 = 0,1876.\end{aligned}$$

Параметр потока отказов параллельной цепи ИП₂-р/пер:

$$\omega_{\text{ИП}_2\text{-р/пер}} = \omega_{21} + \dots + \omega_{28} + \omega_{\text{р/пер}}.$$

В резервную переключку входят два автоматических выключателя и кабельная линия 0,4 кВ. Параметр потока отказов р/пер:

$$\begin{aligned}\omega_{\text{р/пер}} &= \omega_{AB} + \omega_{L_{0,4\text{кВ}}} + \omega_{AB} = 2\omega_{AB} + \omega_{L_{0,4\text{кВ}}} = 2 \cdot 0,051 + 0,0013 = 0,1033; \\ \omega_{\text{ИП}_2\text{-р/пер}} &= \omega_{B_2} + \omega_{L_3} + \omega_{T_2} + \omega_{AB_4} + \omega_{AB_5} + \omega_{L_4} + \omega_{AB_6} + \omega_{\text{ШРс}} + \omega_{\text{р/пер}} = \\ &= 0,015 + 0,001 + 0,015 + 3 \cdot 0,051 + 0,0026 + 0,001 + 0,1033 = 0,2909.\end{aligned}$$

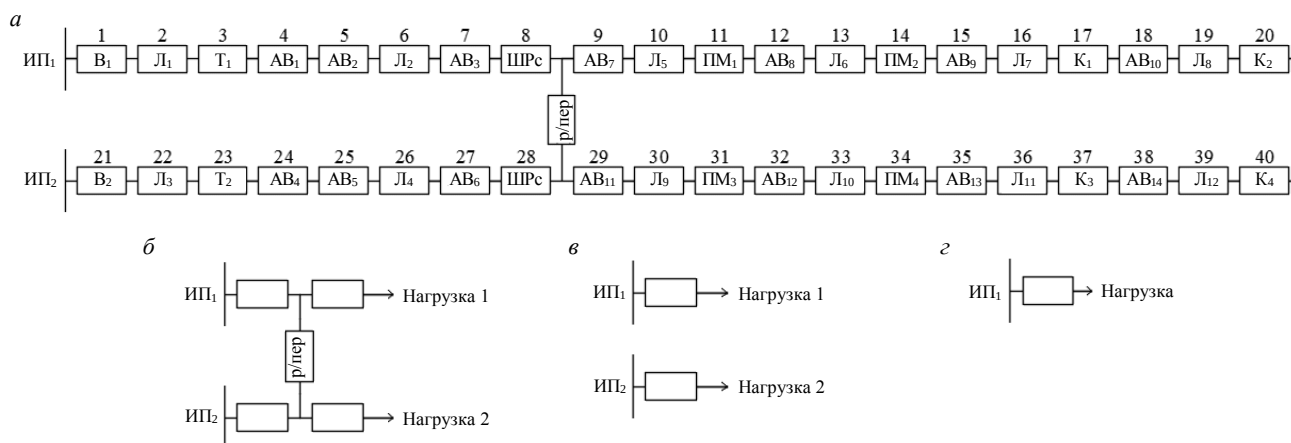


Рис.3. Логическая схема надежности для участка сети с резервированием на НН (а), этапы преобразования: первый (б), второй (в) и третий (з)

Параметр потока отказов цепи р/пер-нагрузка₁:

$$\omega_{\text{р/пер-нагр}_1} = \omega_9 + \dots + \omega_{20} = \omega_{\text{AB}_7} + \omega_{\text{Л}_5} + \omega_{\text{ПМ}_1} + \omega_{\text{AB}_8} + \omega_{\text{Л}_6} + \omega_{\text{ПМ}_2} + \omega_{\text{AB}_9} + \omega_{\text{Л}_7} + \omega_{\text{К}_1} + \omega_{\text{AB}_{10}} + \omega_{\text{Л}_8} + \omega_{\text{К}_2} = 4\omega_{\text{AB}} + 4\omega_{\text{Л}} + 2\omega_{\text{ПМ}} + 2\omega_{\text{К}} = 4 \cdot 0,051 + 4 \cdot 0,0013 + 2 \cdot 0,095 + 2 \cdot 0,098 = 0,5952.$$

Параметр потока отказов параллельной цепи р/пер-нагрузка₂:

$$\omega_{\text{р/пер-нагр}_2} = \omega_{29} + \dots + \omega_{40} = 0,5952.$$

Второй этап представлен на рис.3, в.

Параметр потока отказов цепи ИП₁-нагрузка₁:

$$\omega_{\text{ИП}_1\text{-нагр}_1} = \omega_{\text{ИП}_1\text{-р/пер}} + \omega_{\text{р/пер-нагр}_1} = 0,1876 + 0,5952 = 0,7828.$$

Параметр потока отказов параллельной цепи ИП₂-нагрузка₂:

$$\omega_{\text{ИП}_2\text{-нагр}_2} = \omega_{\text{ИП}_2\text{-р/пер}} + \omega_{\text{р/пер-нагр}_2} = 0,2909 + 0,5952 = 0,8861.$$

На третьем этапе требуется рассчитать вероятности появления отказа последовательных ветвей. Вероятности безотказной работы цепей:

$$P_{\text{ИП}_1\text{-нагр}_1} = e^{-0,7828} = 0,4571;$$

$$P_{\text{ИП}_2\text{-нагр}_2} = e^{-0,8861} = 0,4123.$$

Вероятности появления отказа цепей:

$$Q_{\text{ИП}_1\text{-нагр}_1} = 1 - e^{-0,7828} = 0,5429;$$

$$Q_{\text{ИП}_2\text{-нагр}_2} = 1 - e^{-0,8861} = 0,5877.$$

Третий этап включает преобразование параллельных ветвей ИП₁-нагрузка₁ и ИП₂-нагрузка₂.

Вероятность появления отказа схемы для системы из двух параллельно соединенных элементов:

$$Q_{\text{схемы}} = Q_{\text{ИП}_1\text{-нагр}_1} Q_{\text{ИП}_2\text{-нагр}_2} = 0,5429 \cdot 0,5877 = 0,319.$$

Вероятность безотказной работы схемы:

$$P_{\text{схемы}} = 1 - Q_{\text{схемы}} = 1 - 0,319 = 0,681.$$

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

$$\omega_{\text{схемы}} = -\ln(P_{\text{схемы}}) = -\ln(0,681) = 0,3842;$$

$$T_{\text{нар.отк}} = 1/0,3842 = 2,6028.$$

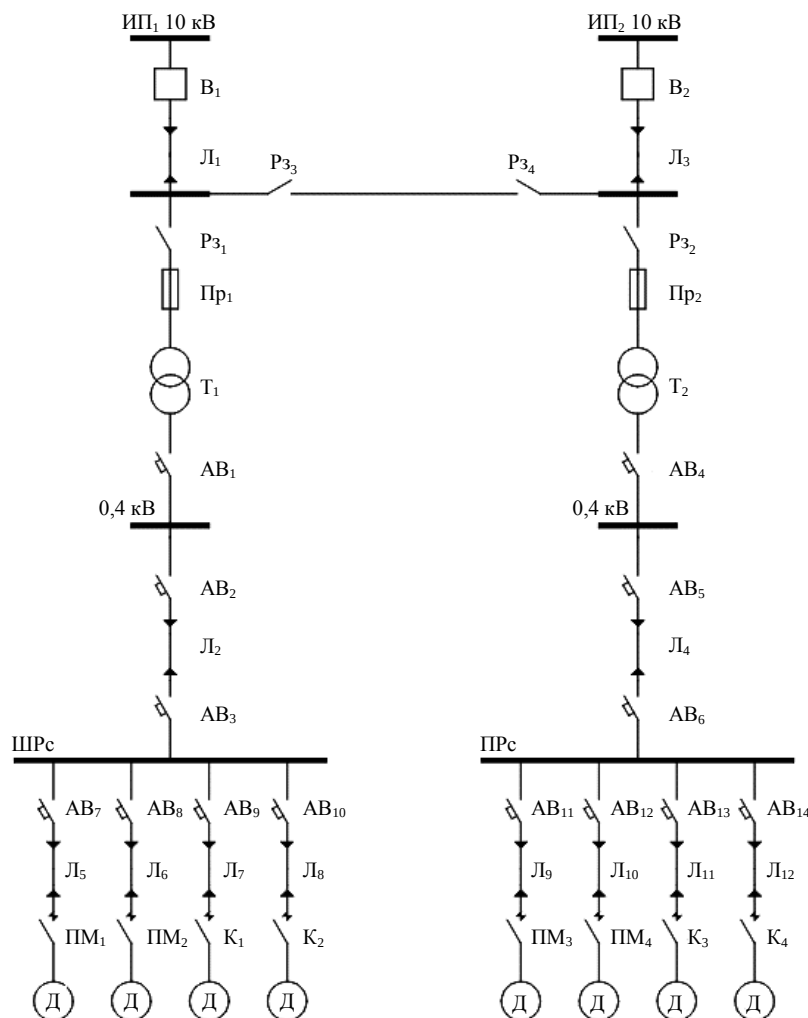


Рис.4. Схема с резервированием на СН, без резервирования на НН

Логическая схема с резервированием линии на СН (с установкой разъединителей P_{33} и P_{34}), без резервирования на НН. На рис.4 представлен вариант петлевой схемы. В случаях малой мощности ИП, удаленности или неэкономичности источник питания является резервным и включается при отключении питания от основного ИП. В случае равноценных ИП электропитание поступает от каждого источника питания.

При аварии на одной из линий отключается питание электропотребителей данной линии разъединителями P_{33} и P_{34} , сохраняется работоспособность смежных участков схемы.

Логико-вероятностная схема надежности (рис.5) содержит две последовательные рабочие цепи (ИП₁-нагрузка₁, ИП₂-нагрузка₂), соединенные параллельной ветвью элементов P_{33} -Л- P_{34} .

Логическая схема надежности и этапы преобразования аналогичны представленным на рис.3.

Резервирование линии СН осуществляется двумя разъединителями P_{33} и P_{34} и кабельной линией Л. Параметр потока отказов $r/\text{пер}$:

$$\omega_{\text{резерв}} = \omega_{45} + \omega_{46} + \omega_{47} = \omega_{P_{33}} + \omega_{\text{Л}} + \omega_{P_{34}}.$$

Вероятности появления отказа и безотказной работы схемы (рис.5, в):

$$Q_{\text{схемы}} = Q_{\text{ИП}_1\text{-нагр}_1} Q_{\text{ИП}_2\text{-нагр}_2} = 0,5371 \cdot 0,5773 = 0,31;$$

$$P_{\text{схемы}} = 1 - Q_{\text{схемы}} = 1 - 0,31 = 0,69.$$

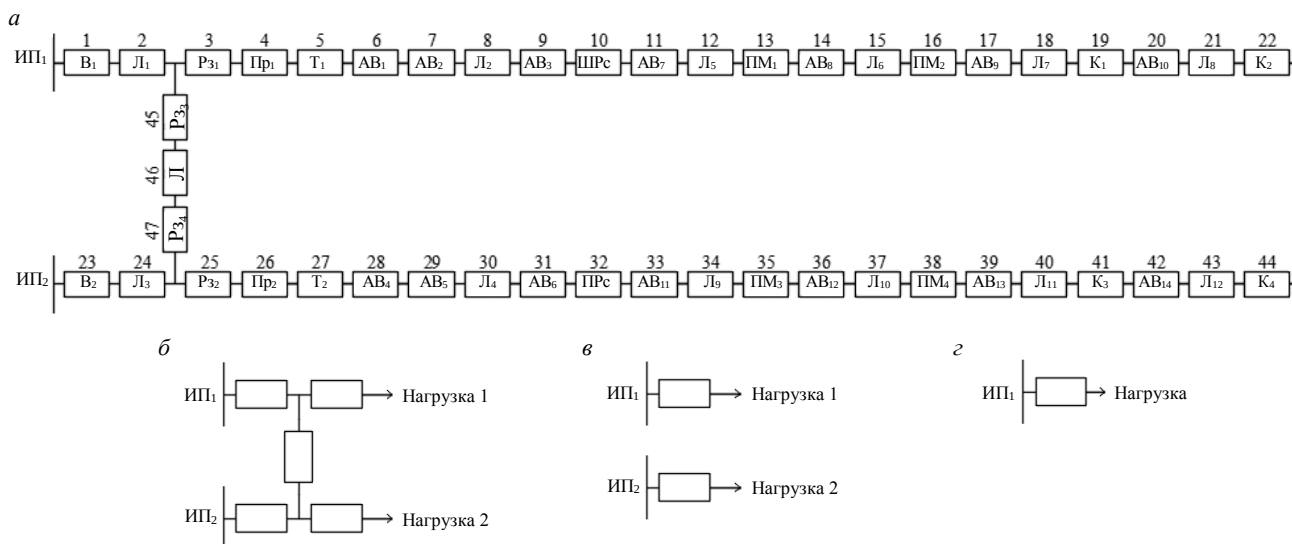


Рис.5. Логическая схема надежности для участка сети с резервированием линии СН, без резервирования на НН (а), этапы преобразования: первый (б), второй (в) и третий (г)

Параметр потока отказов и время наработки на отказ:

$$\omega_{\text{схемы}} = -\ln(P_{\text{схемы}}) = -\ln(0,69) = 0,3711;$$

$$T_{\text{нар.отк}} = 1/0,3711 = 2,6947.$$

Схема участка сети с двойным резервированием (с резервированием на СН и НН, установкой разъединителей $P_{з3}$ и $P_{з4}$, резервной перемычкой 0,4 кВ). На рис.6 показан участок кольцевой схемы. Кольцевая схема должна быть связана не менее чем с двумя территориально удаленными, независимыми ИП. Кольцевая схема обеспечивает надежное электроснабжение, и при этом учитывается возможное развитие схемы сети с ростом нагрузок отдельных потребителей. Для электропитания потребителей I и II категорий надежности используются петлевые, кольцевые и комбинированные схемы, при этом возможна установка на ТП одного трансформатора (рис.6, T_1 , T_2). Для электроснабжения районов с электроприемниками I и II категорий рекомендуется применение комбинированной петлевой схемы, для районов с электроприемниками III категории – петлевой схемы (см. рис.2, 4).

В нормальном режиме кольцевой схемы (рис.6) линия СН разомкнута разъединителями $P_{з3}$ и $P_{з4}$, и каждый участок схемы питается от ИП независимо. Резервная перемычка 0,4 кВ должна находиться под напряжением при разомкнутом участке СН.

На рис.7 приведена логическая схема надежности схемы с двойным резервированием.

Первый этап преобразования заключается в эквивалентировании последовательных ветвей исходной схемы (рис.7, а):

$$\omega_{\text{ИП}_1-\text{Л}_1} = \omega_1 + \omega_2;$$

$$\omega_{\text{ИП}_2-\text{резерв}} = \omega_{23} + \omega_{24} + \omega_{\text{резерв}} = \omega_{23} + \omega_{24} + \omega_{45} + \omega_{46} + \omega_{47};$$

$$\omega_{P_{з3}-\text{ШРс}} = \omega_3 + \omega_4 + \omega_5 + \omega_6 + \omega_7 + \omega_8 + \omega_9 + \omega_{10};$$

$$\begin{aligned} \omega_{P_{з2}-\text{р/пер}} &= \omega_{25} + \omega_{26} + \omega_{27} + \omega_{28} + \omega_{29} + \omega_{30} + \omega_{31} + \omega_{32} + \omega_{\text{р/пер}} = \\ &= \omega_{25} + \omega_{26} + \omega_{27} + \omega_{28} + \omega_{29} + \omega_{30} + \omega_{31} + \omega_{32} + \omega_{48} + \omega_{49} + \omega_{50}; \end{aligned}$$

$$\omega_{\text{р/пер-нагр}_1} = \omega_{11} + \omega_{12} + \dots + \omega_{22};$$

$$\omega_{\text{р/пер-нагр}_2} = \omega_{33} + \omega_{34} + \dots + \omega_{44}.$$

Далее рассчитывается вероятность безотказной работы:

$$P_{\text{ИП}_1-\text{Л}_1} = e^{-\omega_{\text{ИП}_1-\text{Л}_1}};$$

$$P_{\text{ИП}_2-\text{резерв}} = e^{-\omega_{\text{ИП}_2-\text{резерв}}},$$

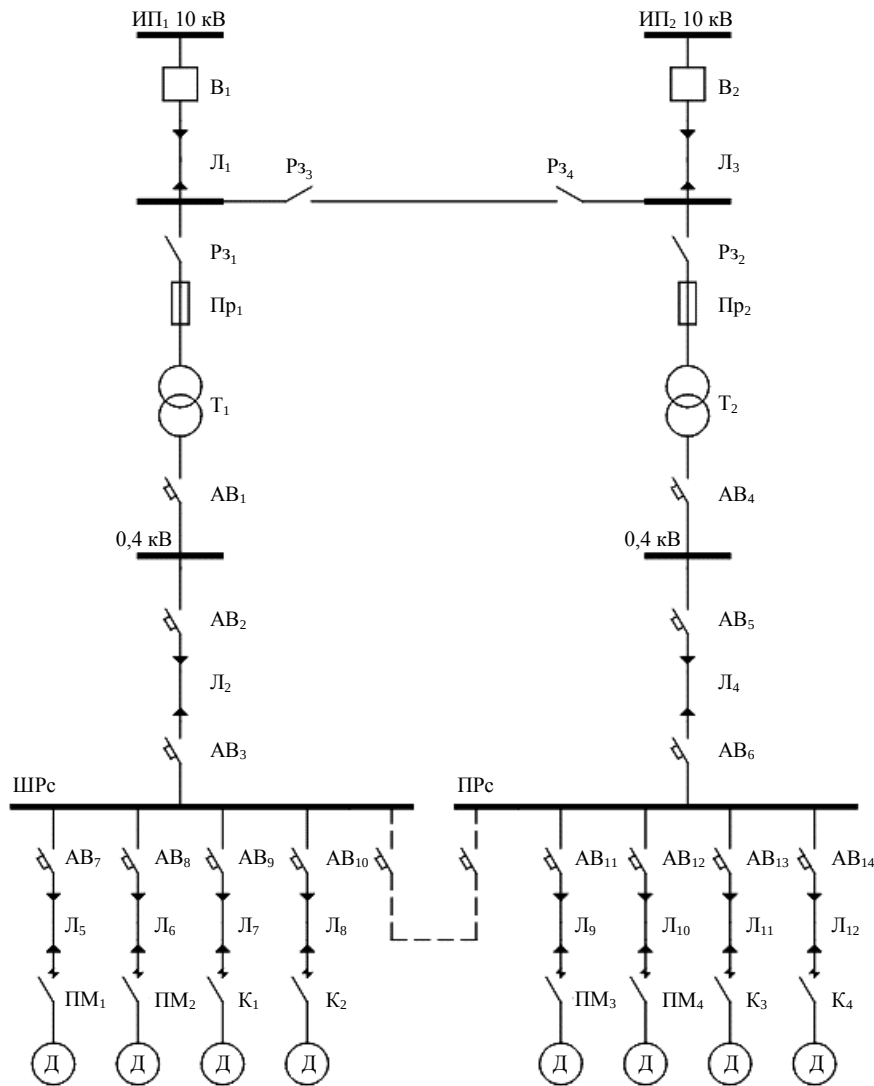


Рис.6. Схема участка сети с двойным резервированием на СН и НН

тогда вероятность отказа:

$$Q_{ИП1-Л1} = 1 - e^{-\omega_{ИП1-Л1}};$$

$$Q_{ИП2-резерв} = 1 - e^{-\omega_{ИП2-резерв}}.$$

Вероятность одновременного отказа параллельных элементов ИП₁-Л₁ и ИП₂-резерв (рис.7, з), определяется как произведение вероятностей отказа этих элементов

$$Q^* = Q_{ИП1-Л1} Q_{ИП2-резерв}.$$

Вероятность безотказной работы параллельных элементов ИП₁-Л₁ и ИП₂-резерв:

$$P^* = 1 - Q_{ИП1-Л1} Q_{ИП2-резерв},$$

тогда параметр потока отказов:

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

Аналогичные расчеты производятся для параллельной ветви Р₃₁-ШРС и Р₃₂-р/пер.

После преобразования последовательных элементов схемы (рис.7, д, е) параметр потока отказов:

$$\omega_{схемы} = 0,2794.$$

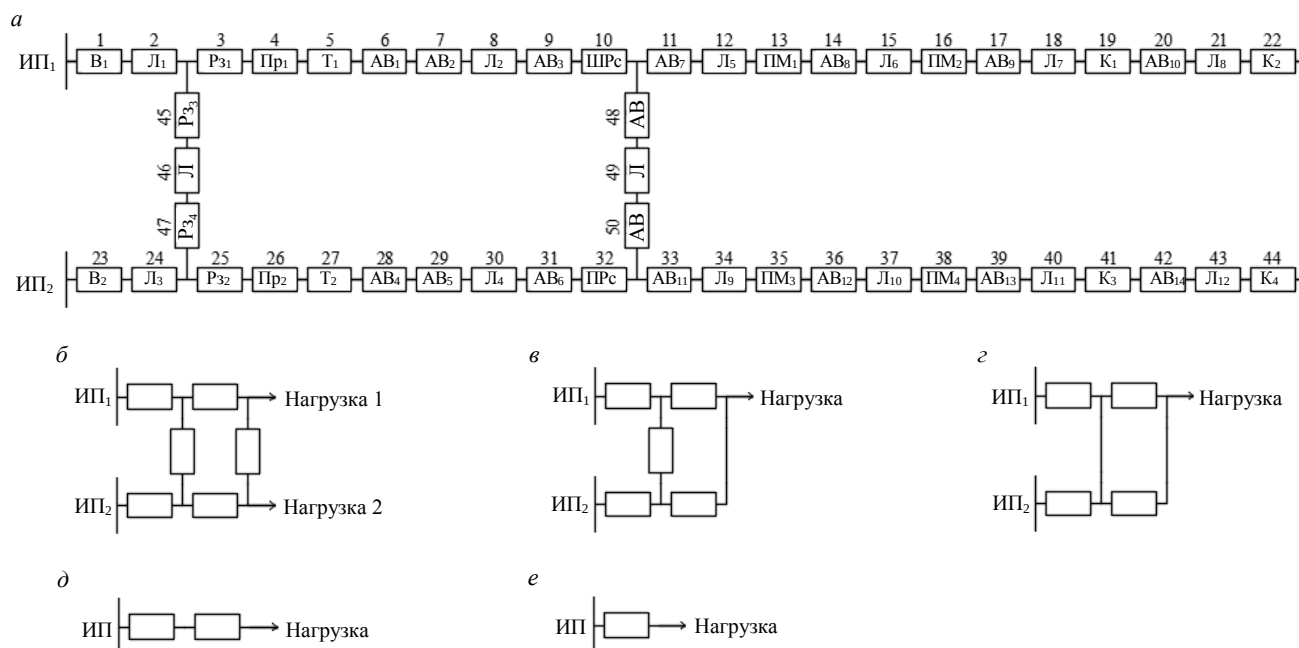


Рис.7. Логическая схема надежности участка сети с двойным резервированием (а), этапы преобразования: первый (б), второй (в), третий (г), четвертый (д), пятый (е)

Время наработки на отказ:

$$T_{\text{нар.отк}} = 1/0,2794 = 3,5791.$$

В табл.2 показаны данные определения параметра потока отказов и времени наработки на отказ (см. рис.1, а, 2, 4, 6).

Таблица 2

Данные определения параметра потока отказов и времени наработки на отказ

Вид резервирования схемы	$\omega_{\text{схемы}}$, ОТКЛ/ГОД	$T_{\text{нар.отк}}$, ГОД
Без резервирования	0,78280	1,27750
С подключением р/пер 0,4 кВ	0,38420	2,60280
С подключением р/пер 10 кВ, без р/пер 0,4 кВ	0,37110	2,69470
С р/пер 10 и 0,4 кВ	0,27940	3,57910

Данные табл.2 показывают, что $\omega_{\text{схемы}}$ схемы без резервирования равен 0,78280 и уменьшается в 2,04 раза при подключении резервной перемычки 0,4 кВ до значения 0,3842. При резервировании цепи на СН $\omega_{\text{схемы}} = 0,3711$. При двойном резервировании параметр потока отказов схемы уменьшается до значения $\omega_{\text{схемы}} = 0,2794$, что почти в три раза меньше, чем для схемы без резервирования. Полученные результаты доказывают высокую надежность схемы с двойным резервированием при одинаковом количестве присоединений элементов к линии.

Величина времени наработки на отказ $T_{\text{нар.отк}}$ обратно пропорциональна параметру потока отказов схемы $\omega_{\text{схемы}}$. Результаты проведенных исследований показали:

- отношение $T_{\text{нар.отк}}$ схемы с резервированием на НН к $T_{\text{нар.отк}}$ схемы без резервирования составляет $2,6028 : 1,2775 = 2,0374$;
- отношение $T_{\text{нар.отк}}$ схемы с резервированием на СН к $T_{\text{нар.отк}}$ схемы без резервирования составляет $2,6947 : 1,2775 = 2,1093$;
- отношение $T_{\text{нар.отк}}$ схемы с двойным резервированием к $T_{\text{нар.отк}}$ схемы без резервирования составляет $3,5791 : 1,2775 = 2,8016$.

Полученные результаты рекомендованы к использованию для технико-экономического обоснования выбора схем цехового электроснабжения.



Заключение

Для повышения достоверности определения параметров надежности СЭС объектов горно-добывающей промышленности следует учитывать причины возникновения возможных отказов оборудования; профилактические мероприятия (исключение известных причин отказов, оптимизация нагрузочных характеристик оборудования); построение зависимостей между внешними воздействиями и показателями надежности.

Резервирование любых элементов электрооборудования повышает надежность электроснабжения, однако для исследуемого промышленного объекта в Кемерово данное решение предлагается впервые. Аналогичные по виду резервирования схемы применяются для системы собственных нужд ТЭЦ, для которых резервирование на среднем напряжении особенно актуально. В результате проведенных расчетов доказано, что резервирование позволяет увеличить время наработки на отказ в 2,11 раз при резервировании на НН или на СН и в 2,8 раз при двойном резервировании.

Исследования показали, что параметр потока отказов схемы с резервированием на НН ($\omega_{\text{схемы}} = 0,3842$) больше, чем параметр потока отказов для схемы с двойным резервированием на СН и НН ($\omega_{\text{схемы}} = 0,2794$) при одинаковом количестве присоединений элементов к линии. Установлено, что надежность схемы с резервированием значительно выше, чем схемы без резервирования ($\omega_{\text{схемы}} = 0,7828$) при одинаковой нагрузке.

Время наработки на отказ имеет максимальное значение при двойном резервировании схемы ($T_{\text{нар.отк}} = 3,5791$) и минимальное – для схемы без резервирования ($T_{\text{нар.отк}} = 1,2775$). Данные расчетов показывают, что $T_{\text{нар.отк}}$ схемы без резервирования в 2,04 и в 2,11 раз меньше, чем для схем с резервированием на НН и на СН соответственно, и в 2,8 раз меньше, чем для схемы с двойным резервированием.

Полученные результаты возможно применять при проектировании и реконструкции СЭС; для технико-экономического обоснования при выборе оптимальных вариантов схем (сравнительный анализ вариантов схем с учетом капитальных и эксплуатационных затрат, расчет экономического эффекта от внедрения систем резервирования, оценка стоимости жизненного цикла оборудования с учетом показателей надежности); при разработке мероприятий по повышению качества и эффективности работы электрооборудования горных предприятий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Багаутдинов И.З. Расчет надежности // Теория и практика современной науки. 2017. № 4 (22). С. 96-99.
2. Ivanova S.P., Pestryaev D.A., Myasnikova T.V., Sveklva O.V. Reliability assessment of switching process control equipment // 2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), 17-19 March 2022, Moscow, Russia. IEEE, 2022. 6 p. DOI: [10.1109/REEPE53907.2022.9731393](https://doi.org/10.1109/REEPE53907.2022.9731393)
3. Скамьин А.Н., Добуш В.С., Шклярский Я.Э., Васильков О.С. Параметры энергосистемы в электротехнических комплексах с нелинейными электрическими нагрузками // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2024. № 6. С. 88-104. DOI: [10.25018/0236_1493_2024_6_0_88](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_6_0_88)
4. 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)
5. Петрова Р.М., Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И. и др. Исследование вероятностных характеристик надежности электрооборудования внутрицеховых систем электроснабжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. № 1 (57). С. 93-105.
6. Кирпичникова И.М., Шипилов С.С. Обеспечение бесперебойного электроснабжения высокотехнологичных предприятий // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». 2022. Т. 22. № 1. С. 55-61. DOI: [10.14529/power220106](https://doi.org/10.14529/power220106)
7. Бельский А.А., Глуханов Д.Ю., Иванченко Д.И. Электроснабжение контролируемых телемеханических пунктов линейной части нефтепровода // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. Вып. 4. С. 183-191. DOI: [10.24412/2071-6168-2021-4-183-191](https://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-4-183-191)
8. Зацепина В.И., Астанин С.С. Анализ надежности системы электроснабжения с учетом отказоустойчивости релейной защиты // Вестник ТГТУ. 2020. Т. 26. № 4. С. 564-570. DOI: [10.17277/vestnik.2020.04.pp.564-570](https://doi.org/10.17277/vestnik.2020.04.pp.564-570)
9. Shpiganovich A., Shpiganovich A., Boychevskiy A. Assessment of Reliability of Individual Units Electrical Equipment by Characteristics Power Supply Systems // 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), 10-12 November 2021, Lipetsk, Russia. IEEE, 2021. P. 1088-1090. DOI: [10.1109/SUMMA53307.2021.9632126](https://doi.org/10.1109/SUMMA53307.2021.9632126)



10. Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Ибатуллин Э.Э. и др. Анализ основных показателей промышленного производства объектов средней мощности // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. № 2 (58). С. 93-108.
11. Токарев И.С. Формирование отраслевой методики расчета параметров системы накопления электроэнергии для объектов газовой промышленности // Записки Горного института. 2025. Т. 272. С. 171-180.
12. Шпиганович А.Н., Зацепин Е.П. Оценка отказоустойчивости систем электроснабжения промышленных предприятий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. Вып. 12. С. 29-35.
13. Changchao Gu, Yihai He, Yi Wei, Xu Ming. Reliability modeling of manufacturing systems based on the task network evolved by key quality characteristics // 2015 First International Conference on Reliability Systems Engineering (ICRSE), 21-23 October 2015, Beijing, China. IEEE, 2015. 5 p. DOI: [10.1109/ICRSE.2015.7366468](https://doi.org/10.1109/ICRSE.2015.7366468)
14. Ying Gao, Qiang Dong, Mo Tao et al. Sensitivity-Analysis-Based Reliability Enhancement for Networked Control Systems // 2021 3rd International Conference on System Reliability and Safety Engineering (SRSE), 26-28 November 2021, Harbin, China. IEEE, 2021. P. 113-117. DOI: [10.1109/SRSE54209.2021.00027](https://doi.org/10.1109/SRSE54209.2021.00027)
15. 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.
16. Конюхова Е.А. Оценка показателей надежности схем при выполнении ТЭО варианта электроснабжения объектов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2018. № 3 (39). С. 34-44.
17. 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.
18. Yao Cheng, Haitao Liao, Elsayed E.A. From Reliability to Resilience: More Than Just Taking One Step Further // IEEE Transactions on Reliability. 2024. Vol. 73. Iss. 1. P. 42-46. DOI: [10.1109/TR.2023.3330960](https://doi.org/10.1109/TR.2023.3330960)
19. 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 // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 29 January 2018 – 01 February 2018, Moscow and St. Petersburg, Russia. IEEE, 2018. P. 632-635. DOI: [10.1109/EIConRus.2018.8317176](https://doi.org/10.1109/EIConRus.2018.8317176)
20. Виноградов А.В., Пеньков Р.А. Анализ повреждаемости электрооборудования электрических сетей и обоснование мероприятий по повышению надежности электроснабжения потребителей // Вестник НГИЭИ. 2015. № 12 (55). С. 12-21.
21. Акимов В.А., Мишурный А.В. Аварии на системах электроснабжения: определение индекса приоритета восстановления электроснабжения // Технологии гражданской безопасности. 2022. Т. 19. № 4 (74). С. 44-47. DOI: [10.54234/CST.19968493.2022.19.4.74](https://doi.org/10.54234/CST.19968493.2022.19.4.74)
22. Shenggang X., Jin L., Jiale L., Rushan C. Research on Reliability and Working Life Assessment Method of Mechanical and Electrical Products in Weapon Equipment // 2019 4th International Conference on System Reliability and Safety (ICSRS), 20-22 November 2019, Rome, Italy. IEEE, 2019. P. 364-368. DOI: [10.1109/ICSRS48664.2019.8987718](https://doi.org/10.1109/ICSRS48664.2019.8987718)
23. Xueyong Tang, Ning Luo, Xin He et al. Energy Production Element Planning of Integrated Gas and Power systems Considering the Coordination between Economic and Reliability // 2021 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), 08-11 April 2021, Chongqing, China. IEEE, 2021. P. 1740-1745. DOI: [10.1109/ACPEE51499.2021.9436885](https://doi.org/10.1109/ACPEE51499.2021.9436885)
24. Zhang Ruifeng, Hao Shuqing, Deng Donglin et al. Low Voltage Power Supply Reliability Evaluation of Distribution Network Based on Data Quality Governance // 2020 4th International Conference on Power and Energy Engineering (ICPEE), 19-21 November 2020, Xiamen, China. IEEE, 2020. P. 75-78. DOI: [10.1109/ICPEE51316.2020.9311017](https://doi.org/10.1109/ICPEE51316.2020.9311017)
25. Zehua Li, Dingkan Liang, Jiahao Wang et al. A Data-driven Technique Based on Power System Reliability Assessment // 2023 3rd Power System and Green Energy Conference (PSGEC), 24-26 August 2023, Shanghai, China. IEEE, 2023. P. 576-581. DOI: [10.1109/PSGEC58411.2023.10255984](https://doi.org/10.1109/PSGEC58411.2023.10255984)
26. Bo He, Yong Liang, Jinlong 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), 27-29 February 2024, Changchun, China. IEEE, 2024. P. 207-210. DOI: [10.1109/EEBDA60612.2024.10485856](https://doi.org/10.1109/EEBDA60612.2024.10485856)
27. Congcong Pan, Bo Hu, Changzheng Shao et al. Reliability-Constrained Economic Dispatch With Analytical Formulation of Operational Risk Evaluation // IEEE Transactions on Power Systems. 2024. Vol. 39. Iss. 2. P. 4422-4436. DOI: [10.1109/TPWRS.2023.3317973](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2023.3317973)
28. Чжан Цзыюань, Курносов Р.А., Юй Чжичжэн. Анализ надежности систем электроснабжения шахт Китая // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. Вып. 3. С. 389-396. DOI: [10.24412/2071-6168-2024-3-389-390](https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-3-389-390)
29. Chen Ying, Ma Qichao, Wang Ze, Li Yingyi. Reliability analysis of k-out-of-n system with load-sharing and failure propagation effect // Journal of Systems Engineering and Electronics. 2021. Vol. 32. Iss. 5. P. 1221-1231. DOI: [10.23919/JSEE.2021.000104](https://doi.org/10.23919/JSEE.2021.000104)
30. Yingying Wang, Vital V., Khorsand M., Singh C. Composite System Reliability Evaluation With Essential Reliability Services Assessment of Wind Power Integrated Power Systems // IEEE Open Access Journal of Power and Energy. 2020. Vol. 7. P. 403-413. DOI: [10.1109/OAJPE.2020.3029119](https://doi.org/10.1109/OAJPE.2020.3029119)
31. Волтковская Н.С., Семенов А.С., Федоров О.В. Энергоэффективность и энергосбережение в системах электроснабжения горнодобывающих предприятий // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. 2019. № 3. С. 52-62.
32. Угольников А.В., Макаров Н.В. Применение систем автоматизации для контроля и учета показателей энергоэффективности эксплуатации компрессорного хозяйства горных предприятий // Записки Горного института. 2019. Т. 236. С. 245-248. DOI: [10.31897/PMI.2019.2.245](https://doi.org/10.31897/PMI.2019.2.245)



33. Ганзуленко О.Ю., Петкова А.П. Энергоэффективность линейного реечного привода штанговых глубинных насосов // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 325-338.
34. Бажин В.Ю., Устинова Я.В., Федоров С.Н., Шалаби М.Э.Х. Повышение энергетической эффективности руднотермических печей при плавке алюмокремниевых сырья // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 384-391.
35. Вистрич М.Г., Гусев В.Н., Сухов А.К. Методика определения погрешностей сегментированных GRID моделей открытых горных выработок, построенных по результатам аэрофотосъемки с беспилотного воздушного судна // Записки Горного института. 2023. Т. 262. С. 562-570.
36. Токарев И.С., Шклярский Я.Э., Андреева Ю.Е., Лаврик А.Ю. Анализ эффективности алгоритма планирования работы электротехнического комплекса с накопителем энергии // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. Вып. 3. С. 334-342. DOI: [10.24412/2071-6168-2024-3-334-335](https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-3-334-335)
37. Шклярский Я.Э., Замятина Е.Н., Замятин Е.О. Влияние показателей качества электроэнергии на энергоэффективность электротехнических комплексов предприятий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 12. С. 400-404.
38. Skamyin A., Shklyarskiy Y., Gurevich I. Influence of Background Voltage Distortion on Operation of Passive Harmonic Compensation Devices // Energies. 2024. Vol. 17. Iss. 6. № 1342. DOI: [10.3390/en17061342](https://doi.org/10.3390/en17061342)
39. Singh P., Singh L.K. Reliability and Safety Engineering for Safety Critical Systems: An Interview Study With Industry Practitioners // IEEE Transactions on Reliability. 2021. Vol. 70. Iss. 2. P. 643-653. DOI: [10.1109/TR.2021.3051635](https://doi.org/10.1109/TR.2021.3051635)
40. Ying Chen, Yanfang Wang, Song Yang, Rui Kang. System Reliability Evaluation Method Considering Physical Dependency with FMT and BDD Analytical Algorithm // Journal of Systems Engineering and Electronics. 2022. Vol. 33. Iss. 1. P. 222-232. DOI: [10.23919/JSEE.2022.000022](https://doi.org/10.23919/JSEE.2022.000022)

Авторы: Рената Маратовна Петрова, аспирант (Казанский государственный энергетический университет, Казань, Республика Татарстан, Россия), 1998renata@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-2508-8771>, Елена Ивановна Грачева, д-р техн. наук, профессор (Казанский государственный энергетический университет, Казань, Республика Татарстан, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.