



МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАДЕЖНОСТИ СХЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ В СРЕДЕ MATLAB/SIMULINK

Петрова ¹Р.М., Грачева ²Е.И.

^{1,2} Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

¹ 1998renata@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-2508-8771>

² grachieva.i@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в разработке компьютерной модели оценки и прогнозирования параметров надежности схем систем электроснабжения объектов с трансформаторными подстанциями напряжением 10/0,4 кВ. МЕТОДЫ. При проведении исследований используются методы теории надежности и теории вероятностей. Проведено моделирование параметров схем электроснабжения в среде Matlab / Simulink для исследования основных показателей надежности (таких, как параметр потока отказов схемы ($\omega_{схемы}$), время наработки на отказ ($T_{нар.отк}$), вероятность безотказной работы (P) и вероятность отказа (Q). Проведено 12 вычислительных экспериментов с изменением исходных параметров для схем различной конфигурации. РЕЗУЛЬТАТЫ. Представлены результаты вычислительных экспериментов с помощью разработанной модели в среде Matlab/Simulink для оценки параметров надежности схем электроснабжения – $\omega_{схемы}$, $T_{нар.отк}$, P и Q при изменении исходных данных. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В работе представлены результаты моделирования в среде Matlab/Simulink. Полученные результаты могут быть рекомендованы для использования при проектировании систем электроснабжения. Применение разработанной модели при проектировании и эксплуатации систем электроснабжения объектов позволяет оценивать параметры надежности схем и управлять надежностью электроснабжения потребителей при эффективной работе электрооборудования.

Ключевые слова: схема электроснабжения; резервирование; надежность; моделирование; трансформатор; кабельная линия.

Для цитирования: Петрова Р.М., Грачева Е.И. Моделирование параметров надежности схем электроснабжения объектов в среде Matlab/Simulink // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 3. С. 37-48. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-37-48.

MODELING OF RELIABILITY PARAMETERS OF ELECTRICAL POWER SUPPLY CIRCUITS OF FACILITIES IN THE MATLAB/SIMULINK ENVIRONMENT

Petrova ¹R.M., Gracheva ²E.I.

^{1,2} Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

¹ 1998renata@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-2508-8771>

² grachieva.i@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>

Abstract: The RELEVANCE of this study is to develop a computer model for assessing and predicting the reliability parameters of power supply system circuits for facilities with 10/0.4 kV transformer substations. METHODS: Reliability theory and probability theory methods were used in the research. The parameters of power supply circuits were modeled in Matlab/Simulink to study key reliability indicators (such as the circuit failure rate parameter ($\omega_{circuit}$), mean time between failures (MTBF), probability of failure-free operation (P), and probability of failure (Q). Twelve computational experiments were conducted with varying initial parameters for circuits of various configurations. RESULTS. The results of computational experiments using the developed model in Matlab/Simulink are presented. They were used to estimate the reliability parameters of power supply circuits – $\omega_{circuit}$, TBF, P , and Q – with varying initial data. CONCLUSION. The paper presents the results of modeling in Matlab/Simulink. The obtained results can be recommended for use in the design of power supply systems. Application

of the developed model in the design and operation of power supply systems at facilities allows for the assessment of circuit reliability parameters and the management of the reliability of power supply to consumers while ensuring the efficient operation of electrical equipment.

Keywords: power supply diagram, redundancy, reliability, modeling, transformer, cable line.

For citation: Petrova R.M., Gracheva E.I. Modeling of reliability parameters of electrical power supply circuits of facilities in the Matlab/Simulink environment. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2026; 28 (3): 37-48. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-37-48.

Введение (Introduction)

Современные системы электроснабжения промышленных предприятий, объектов городской и агропромышленной инфраструктуры являются составными частями сложных электротехнических комплексов. Их бесперебойная и качественная работа является основным фактором экономической и технологической безопасности. Поэтому точная оценка показателей надежности таких систем является важным условием как на этапе проектирования, так и в процессе эксплуатации.

Классические методы оценки надежности, основанные на анализе структурных схем, составлении систем дифференциальных уравнений Маркова или методе статистических испытаний (Монте-Карло), обладают рядом существенных ограничений. Аналитические методы при всей своей строгости становятся чрезвычайно громоздкими для сложных разветвленных схем с восстановлением, требуя значительных упрощающих допущений. Прямая реализация метода Монте-Карло при помощи универсальных языков программирования, в свою очередь, часто лишена наглядности и требует больших вычислительных ресурсов для достижения приемлемой точности, особенно для анализа редких событий, а именно, отказов электрооборудования.

Особую сложность представляет задача исследования чувствительности показателей надежности к изменению технических параметров элементов системы. К таким параметрам относятся: интенсивность отказов оборудования схемы (λ), время наработки на отказ ($T_{\text{нар.отк}}$), вероятности безотказной работы и появления отказа (P и Q), длительность технического обслуживания и плановых ремонтов, уровень нагрузки на оборудование, параметры резервирования. Традиционные методы требуют проведения множества трудоемких расчетов при огромном количестве различных значений входных данных, что является трудоемким процессом.

Развитие инженерного моделирования открывает новые возможности для решения указанных задач. *Matlab / Simulink* является одним из инструментов для решения научных и инженерных задач, который позволяет использовать технический вычислительный потенциал для построения алгоритмов расчета параметров сложных взаимосвязанных систем. При этом преимуществами для расчета параметров надежности являются:

- блочно-иерархический принцип построения моделей,
- генератор случайных чисел для имитации отказов,
- встроенные библиотеки для анализа данных и визуализации результатов,
- возможность создания интерактивных интерфейсов для исследования влияния параметров.

Целью настоящего исследования является разработка методики и создание модели в среде *Matlab/Simulink* для комплексной оценки параметров надежности схем электроснабжения и анализа их изменения при вариациях технико-эксплуатационных характеристик элементов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- 1) Провести анализ литературных источников результатов исследований в данной области;
- 2) Провести анализ типовых схем электроснабжения с использованием различных видов резервирования;
- 3) Разработать алгоритм выполнения расчетов для исследуемых систем электроснабжения;
- 4) Разработать в программной среде *Matlab / Simulink* алгоритмы расчета следующих показателей надежности: параметров потоков отказов схемы $\omega_{\text{схемы}}$, а также $T_{\text{нар.отк}}$, P и Q ;
- 5) Провести вычислительные эксперименты на примере типовых схем для оценки достоверности разработанной модели.

Научная новизна работы заключается в применении приложения *Simulink* для моделирования параметров надежности схем электроснабжения с различными видами резервирования, что позволяет наглядно представить характеристики схемы, выбрать оптимальное число трансформаторов и их номинальную мощность, коэффициент загрузки трансформатора, общую площадь исследуемого объекта.

Практическая значимость состоит в разработке универсальной модели расчета параметров надежности схем электроснабжения, позволяющей инженерам-проектировщикам и исследователям проводить быстрый анализ и оптимизацию схемных и режимных параметров проектируемых и эксплуатируемых систем электроснабжения при вариации исходных данных.

В представленном обзоре проведен анализ некоторых исследований российских и зарубежных ученых, посвященных оценке параметров надежности систем электроснабжения, а также моделированию в программной среде *Matlab / Simulink*.

Как известно, надежность электроснабжения потребителей зависит от надежности всех элементов системы электроснабжения, в том числе устройств релейной защиты и автоматики (РЗА). Виноградов А.В., Лансберг А.А. и др. [1] определили численные значения следующих показателей надежности устройств релейной защиты и автоматики: потока отказов и частоту излишних срабатываний.

Герасимовым Д.О. и Суловым К.В. в [2] предложен подход, объединяющий методы моделирования надежности мультиэнергетических систем, который апробирован на имитационной модели энергетического объекта.

Ибрагим М., Пантелеев В. И. в [3] разработали модели систем управления для повышения стабилизации частоты сети переменного тока в программной среде *Matlab*.

Моденов М.Ю., Чуканов А.Н., Цой Е.В. в [4] разработали математическую модель летательного аппарата, апробированную в программном комплексе *Matlab* с помощью дополнения *Simulink* с учетом различных условий эксплуатации.

Петров А.Р., Грачева Е.И., Абдуллазянов Э.Ю. в [5] исследовали параметры надежности контактов низковольтных коммутационных аппаратов (НКА), устанавливаемых в низковольтных электрических сетях систем электроснабжения промышленных предприятий. Результаты исследования рекомендованы для построения модели для определения основных параметров надежности цеховой сети электроснабжения.

Петровой Р. М., Грачевой Е. И. в работе [6] выявлены законы изменения вероятностных характеристик надежности коммутационных аппаратов и кабельных линий низкого напряжения.

Петрова Р.М. и др. [7] и Петрова Р.М., Грачева Е.И. [8] провели оценку параметров надежности схем с трансформаторными подстанциями, определив преимущества рационального резервирования, где время наработки на отказ достигло 4,2 года для схемы с двойным резервированием.

В работе Романенко Н.Г., Головки Ю.А. и др. [9] смоделирована система управления насосом охлаждения главного дизеля в среде *Matlab / Simulink*.

Саттаровым Р.Р. и Гарафутдиновым Р.Р. в [10] предлагается алгоритм моделирования виртуального синхронного генератора для повышения динамической устойчивости энергосистемы. Предложен способ моделирования виртуального синхронного генератора в программном комплексе *Matlab*. С помощью разработанной модели возможно управлять устойчивостью системы с обеспечением условий поддержания параметров электрической сети в допустимых пределах.

Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А. и др. в [11] исследовали возможность повышения эффективности работы низковольтных коммутационных аппаратов с помощью тепловизионного обследования.

В исследовании N. Bhuvaneshwary, V. J. Reddy и др. [12] представлена модель обнаружения неисправностей электрической системы и мониторинга с помощью *Matlab / Simulink*. Модель эффективно идентифицирует различные неисправности электрической системы, такие как короткое замыкание (КЗ), неисправности линии и трехфазные замыкания.

В работе W. Guo, Y. He и X. Ling [13] рассматриваются вопросы проектирования и моделирования интеллектуальных систем транспортных средств с использованием *Matlab / Simulink*. В исследовании используется *Simulink* для системного моделирования и функции *Matlab* для реализации алгоритмов управления интеллектуальной системой, создания интегрированной основы для тестирования и проверки работоспособности системы.

Р. М. Petrova, Е. I. Gracheva и др. в [14] представили исследование и оценку параметров надежности и выбора рациональной топологии схем электроснабжения

объектов с трансформаторными подстанциями 10/0,4 кВ с помощью технических и экономических критериев. Авторы представили разработанную методику выбора способа резервирования схем электроснабжения с учетом затрат на оборудование схемы и параметров надежности электроустановок.

У. Li, Т. Chen и др. в [15] показывают систему моделирования надежности, предназначенную для эффективного управления неиспользованными ресурсами хранения энергии базовых электростанций.

В работе Q. Yu и др. [16] представлен усовершенствованный алгоритм расчета для улучшения производительности системы с механизмом мгновенного автоматического распознавания аварийных ситуаций в энергосети с помощью онлайн-управления, что повышает быстродействие системы и надежность электроснабжения в целом.

Работа Е.А. Рапова и А.Т. Nasibullin [17] посвящена разработке математических моделей основных релейных защитных устройств, интегрированных в схему узловой подстанции 220/110 кВ с использованием среды моделирования *Matlab / Simulink* и *Stateflow* (для описания логики работы защит). Применение математической модели повышает точность расчета параметров системы электропитания в различных режимах работы и позволяет использовать одну модель для решения совокупности задач. Основным преимуществом модели является блочная структура построения, что позволяет легко изменять заданные параметры и сборку конфигурации схемы.

Работа V. A. Paseka [18] посвящена сравнительному анализу методов расчета установившихся режимов и моделирования переходных процессов в электроэнергетических системах с использованием программных комплексов *Matlab / Simulink* и *RUSTAB* и *MUSTANG*.

Таким образом, представленный анализ литературных источников отечественных и зарубежных авторов показывает развитие методов оценки и способов повышения надежности электрических систем, а также использование программной среды *Matlab / Simulink* для моделирования.

Материалы и методы (Materials and methods)

На рисунке 1 приведена схема части системы электроснабжения с двойным резервированием: на 10 и 0,4 кВ.

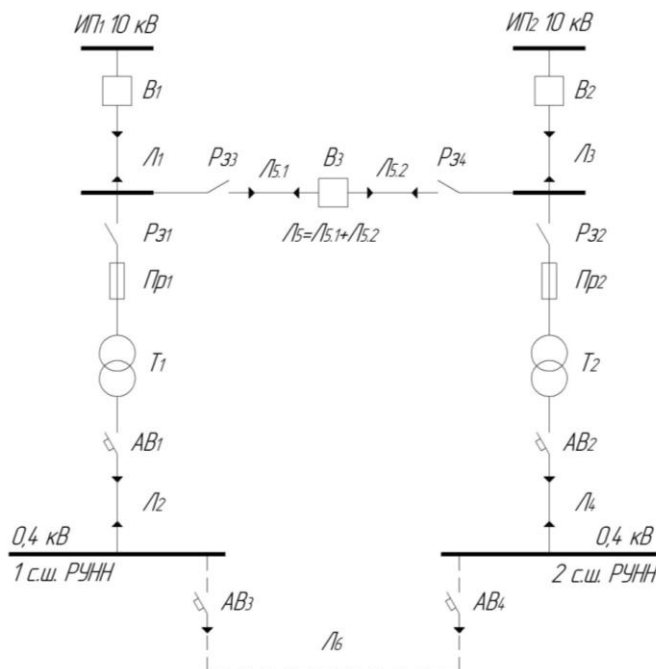


Рис. 1. Схема части системы электроснабжения с двойным резервированием
 Fig. 1. Diagram of a part of the power supply system with double redundancy

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

На рисунке 1 показан участок системы электроснабжения с двойным резервированием на среднем и низком напряжениях (СН и НН соответственно). Данная схема (рис. 1) по своей структуре является петлевой [7]. В петлевой схеме электропитание

подаются по кабельным линиям (КЛ), образующим замкнутый контур [8]. Данная топология обеспечивает наличие резервных путей передачи электроэнергии между источниками питания (ИП₁ и ИП₂) и потребителями, что способствует повышению надежности и устойчивости системы при аварийных ситуациях, повреждениях или отключениях отдельных участков сети. Использование петлевых схем позволяет реализовать режимы автоматического переключения и резервирования [8].

Обсуждение (Discussions)

На рис. 2 представлено графическое описание блок-схемы алгоритма расчетов для петлевой схемы электроснабжения.

Блок-схема расчетов (рис. 2) включает: Блок 1 (Начало) → Блок 2 (Ввод исходных данных) → Блок 3 (Расчеты по формулам (1)-(8)) → Блок 4 (Условный переход для петлевой схемы электроснабжения) → Блок 5 (Расчет по формулам (9)-(10)) → Блок 6 (Расчет по формулам (11)-(15)) → Блок 7 (Вывод данных по формулам (12)-(15)) → Блок 8 (Конец).

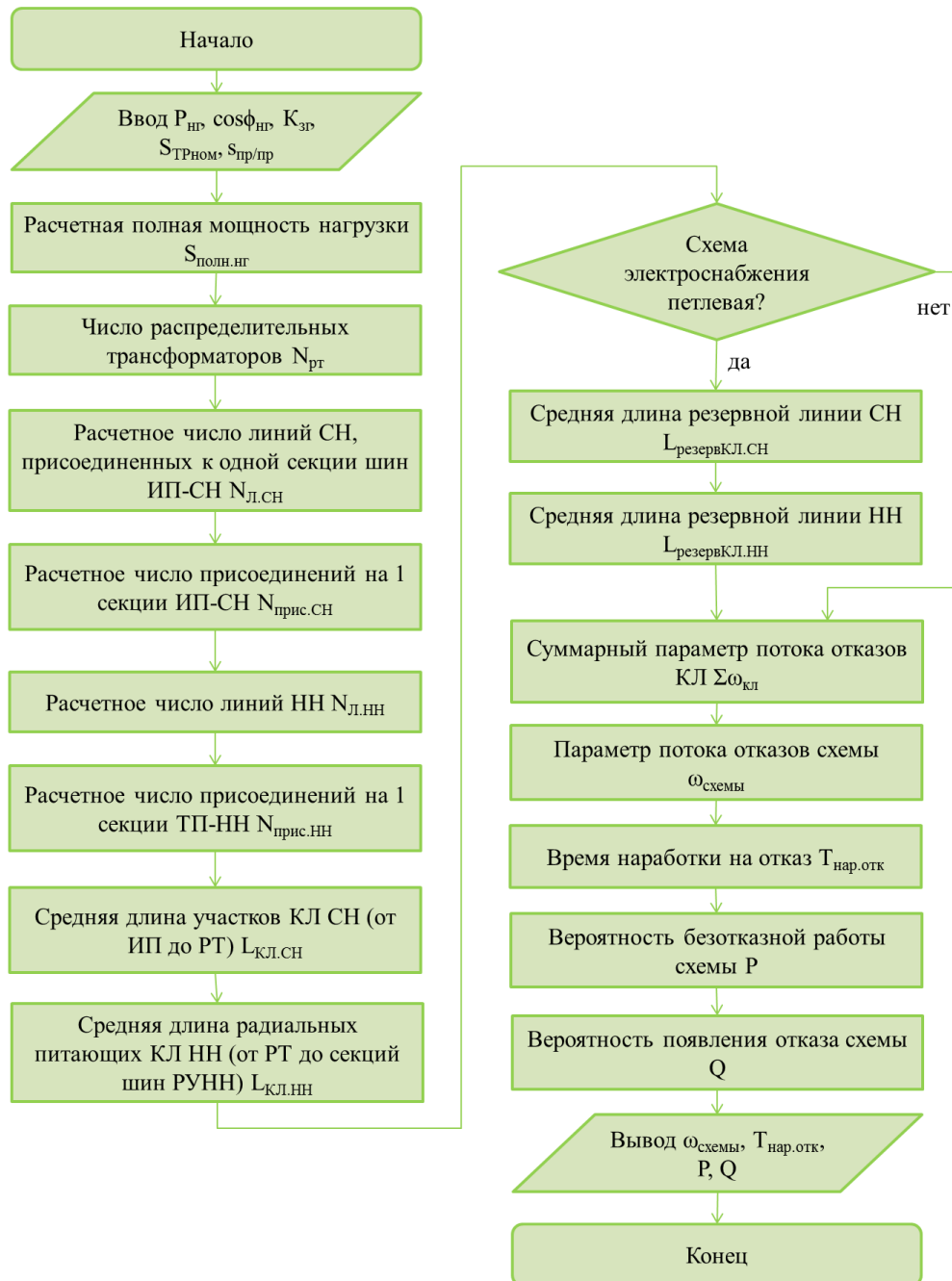


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчетов

Fig. 2. Block diagram of the calculation algorithm

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

Для выполнения расчетов требуется ввод следующих исходных данных:

- 1) $P_{нгр}$ – активная мощность нагрузки, МВт;
- 2) $\cos\phi_{нгр}$ – коэффициент мощности;

- 3) $K_{зг}$ – коэффициент загрузки трансформатора;
 4) $S_{ТРном}$ – единичная номинальная мощность трансформатора, МВА;
 5) $S_{пр/пр}$ – общая площадь производственного объекта, км².

Далее расчет проводится по формулам (1)-(15).

Расчетная полная мощность нагрузки, МВА, равная

$$S_{полн.нг} = \frac{P_{нг}}{\cos \varphi_{нг}} \quad (1)$$

Число распределительных трансформаторов (далее РТ) $N_{РТ}$

$$N_{РТ} = \frac{P_{нг}}{\cos \varphi_{нг} \cdot K_{зг} \cdot S_{ТРном}} = \frac{S_{полн.нг}}{K_{зг} \cdot S_{ТРном}} \quad (2)$$

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

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

где $n_{сш}$ – число секций шин ИП-СН;

$N_{РТ.прис}$ – число РТ, присоединенных к линии СН, принимаем $N_{РТ} = 1 \dots 5$.

Расчетное число присоединений на 1 секции ИП-СН

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

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

Расчетное число линий НН

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

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

Расчетное число присоединений на 1 секции РТ-НН

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

Далее рассчитываются средние длины КЛ СН и НН, а также средние длины резервных линий СН и НН (при петлевой схеме электроснабжения).

Средняя длина участков КЛ СН (от ИП до РТ), км рассчитывается как

$$L_{КЛ.СН} = \gamma_{ип} \cdot \frac{\sqrt{S_{пр/пр}}}{\sqrt{N_{РТ}}}, \quad (7)$$

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

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

$$L_{КЛ.НН} = \gamma_{рт} \cdot \frac{\sqrt{S_{пр/пр}}}{\sqrt{N_{РТ}}}, \quad (8)$$

где $\gamma_{рт}$ – коэффициент, учитывающий расположение РТ до секций шин РУНН, принимаем $\gamma_{рт} = 1$.

Средняя длина резервной КЛ СН, км

$$L_{резерв.КЛ.СН} = \gamma_{ип} \cdot \frac{\sqrt{S_{пр/пр}}}{\sqrt{1 + N_{РТ}}} \quad (9)$$

Средняя длина резервной КЛ НН, км

$$L_{резерв.КЛ.НН} = \gamma_{рт} \cdot \frac{\sqrt{S_{пр/пр}}}{\sqrt{1 + N_{РТ}}} \quad (10)$$

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

$$\begin{aligned} \Sigma \omega_{кл} &= \omega_{кл.СН} + \omega_{кл.НН} = \\ &= \sum_{прис.СН} \omega \cdot (L_{КЛ.СН} + L_{резерв.КЛ.СН}) + \\ &+ \sum_{прис.НН} \omega \times (L_{КЛ.НН} + L_{резерв.КЛ.НН}) \end{aligned} \quad (11)$$

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

Значение параметра потока отказов схемы $\omega_{\text{схемы}}(t)$, откл/год

$$\omega_{\text{схемы}}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Q(t, t + \Delta t)}{\Delta t} \quad (12)$$

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

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

$$T_{\text{нар.отк}} = \frac{1}{\omega_{\text{схемы}}} \quad (13)$$

Вероятность безотказной работы схемы

$$P = e^{-\omega_{\text{схемы}}} \quad (14)$$

Вероятность появления отказа схемы

$$Q = 1 - P = 1 - e^{-\omega_{\text{схемы}}} \quad (15)$$

По рисунку 2 производится вывод следующих параметров: $\omega_{\text{схемы}}$, $T_{\text{нар.отк}}$, P и Q .

Для автоматизации представленного алгоритма расчетов (рис. 2) проведем моделирование параметров надежности в среде Matlab/Simulink.

На рисунке 3 представлена модель алгоритма расчета параметров надежности схемы электроснабжения, разработанная в Matlab/Simulink, для $\omega_{\text{схемы}}$, $T_{\text{нар.отк}}$, P и Q . Для задания исходных данных для моделирования и оценки параметров надежности использовались блоки программы *Matlab* из библиотеки *Simulink*:

- 1) для задания диапазонов исходных данных (*Constant*);
- 2) для проведения вычислительных операций по выражениям (1)-(15):
 - блоки постоянных значений (*Constant*);
 - блоки сумма (*Sum*), умножение (*Product*), деление (*Divide*), корень (*Sqrt*);
 - блоки основных математических функций (*Math Function*);
 - функция округления (*ceil(X)* – округляет каждый элемент массива X до ближайшего целого числа, большего или равного этому элементу, то есть в сторону положительной бесконечности до целого большего числа;
- 3) для вывода параметров (*Display*).

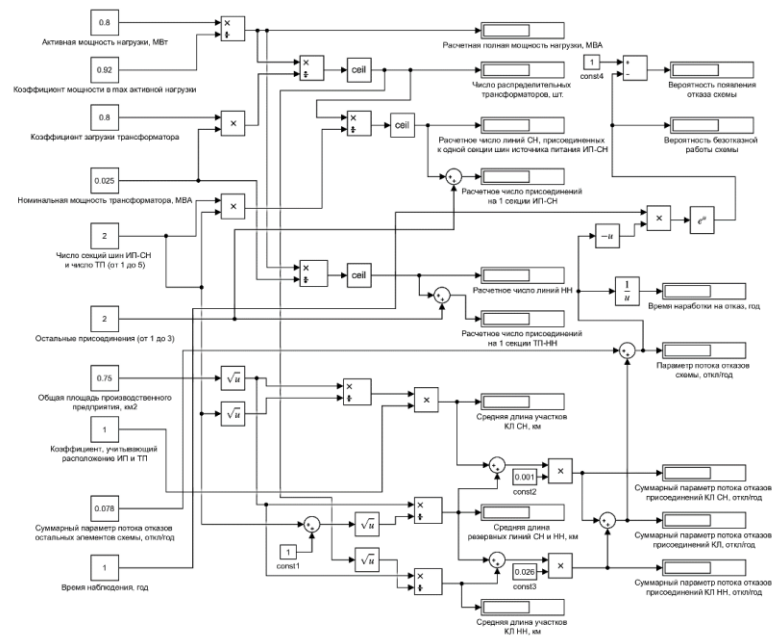


Рис. 3. Модель алгоритма расчета параметров надежности схемы электроснабжения в среде Matlab/Simulink

Fig. 3. Model of the algorithm for calculating the reliability parameters of a power supply circuit in the Matlab/Simulink environment

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

В таблице 1 приведены граничные условия исходных данных для подстановки в алгоритм расчета параметров надежности схемы в модель *Simulink*.

Таблица 1
Table 1

Граничные условия исходных данных для моделирования параметров надежности
Boundary conditions of the initial data for modeling reliability parameters

№	Параметр	Минимальное значение	Максимальное значение
1	Активная мощность нагрузки $P_{нГ}$, МВт	0,8	1,6
2	Коэффициент мощности в тах активной нагрузки $\cos\phi_{нГ}$	0,75	0,95
3	Коэффициент загрузки трансформатора $k_{зГ}$	0,1	1,2
4	Номинальная мощность трансформатора $S_{Трном}$, МВА	0,025	2,5
5	Число секций шин ИП-СН и число трансформаторных подстанций (ТП)	1	5
6	Остальные присоединения	1	3
7	Общая площадь производственного предприятия $S_{пр/пр}$, км ²	0,25	2
8	Суммарный параметр потока отказов остальных элементов схемы, откл/год	0,039	0,195
9	Время наблюдения t , год	1	7

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

Данные таблицы 1 показывают, что разработанная модель позволяет изменять исходные параметры схемы с рассматриваемыми диапазонами, например, $S_{Трном}$ изменяется от 0,025 до 2,5 МВА, $P_{нГ}$ увеличивается в 2 раза с учетом роста мощности нагрузки (с 0,8 до 1,6 МВт), $S_{пр/пр}$ увеличивается в 8 раз – с 0,25 до 2 км², что позволяет использовать модель для расчетов объектов различной мощности нагрузки и площади объекта.

Результаты (Results)

Проведем расчет параметров надежности схемы при следующих исходных данных:

- 1) $P_{нГ} = 1,2$ МВт;
- 2) $\cos\phi_{нГ} = 0,92$;
- 3) $k_{зГ} = 0,8$;
- 4) $S_{Трном} = 1,6$ МВА;
- 5) Число секций шин ИП-СН и число ТП = 2;
- 6) Остальные присоединения (трансформаторов, ККУ и прочего) = 2;
- 7) $S_{пр/пр} = 0,75$ км²;
- 8) Коэффициент, учитывающий расположение ИП и ТП = 1;
- 9) Суммарный параметр потока отказов остальных элементов схемы = 0,078 откл/год (т.к. число ТП = 2);
- 10) Время наблюдения $t = 3$ года.

Результаты моделирования приведены на рисунке 4.

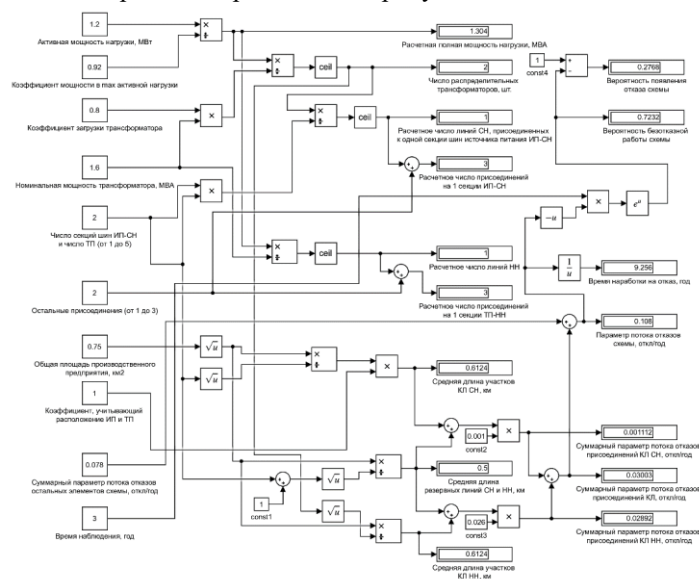


Рис. 4. Результаты моделирования параметров надежности схемы электроснабжения в среде Matlab/Simulink

Fig. 4. Results of modeling the reliability parameters of the power supply circuit in the Matlab/Simulink environment

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

Результаты расчетов при моделировании:

- 1) Расчетная полная мощность нагрузки 1,304 МВА;
- 2) Число распределительных трансформаторов 2 шт;
- 3) Расчетное число линий СН, присоединенных к одной секции шин ИП-СН – 1;
- 4) Расчетное число присоединений на 1 секции ИП-СН – 3;
- 5) Расчетное число линий НН – 1;
- 6) Расчетное число присоединений на 1 секции ТП-НН – 3;
- 7) Средняя длина участков КЛ СН 0,6124 км;
- 8) Средняя длина резервных линий СН и НН 0,5 км;
- 9) Средняя длина участков КЛ НН 0,6124 км;
- 10) Суммарный параметр потока отказов присоединений КЛ СН 0,001112 откл/год;
- 11) Суммарный параметр потока отказов присоединений КЛ НН 0,02892 откл/год;
- 12) Суммарный параметр потока отказов присоединений КЛ 0,03003 откл/год;
- 13) Параметр потока отказов схемы 0,106 откл/год;
- 14) Время наработки на отказ 9,256 года;
- 15) Вероятность безотказной работы схемы = 0,7232;
- 16) Вероятность появления отказа = 0,2768.

Проведем 12 вычислительных экспериментов, изменяя исходные параметры схемы: $P_{нг}$ от 0,8 до 1,6 МВт, $k_{зг}$ от 0,65 до 1,0, $S_{ТРном}$ от 0,025 до 2,5 МВА, число ТП от 2 до 5, $s_{пр/пр}$ от 0,75 до 2,0 км² с шагом 0,25 км², время наблюдение от 1 до 5 лет. В таблице 2 представлены результаты моделирования параметров надежности схемы электроснабжения в *Matlab/Simulink* при изменении исходных данных.

Таблица 2

Table 2

Результаты моделирования параметров надежности схемы электроснабжения при изменении исходных данных

The results of modeling the reliability parameters of the power supply scheme when the initial data changes

№ п/п	Исходные данные						Результаты моделирования			
	$P_{нг}$, МВт	$k_{зг}$	$S_{ТРном}$, МВА	Число ТП	$s_{пр/пр}$, км ²	t, ГОД	$\omega_{схемы}$	$T_{нар.отк}$	P	Q
1	0,8	0,65	0,025	2	0,75	1	0,09518	10,51	0,9092	0,09079
2	0,9	0,7	0,04	2	0,75	2	0,09592	10,43	0,8254	0,1746
3	1,0	0,75	0,063	2	1,0	3	0,0996	10,04	0,7417	0,2583
4	1,05	0,8	0,1	3	1,0	3	0,09879	10,12	0,7435	0,2565
5	1,1	0,85	0,16	3	1,25	3	0,1034	9,669	0,7332	0,2668
6	1,2	0,85	0,25	3	1,25	3	0,1047	9,549	0,7304	0,2696
7	1,3	0,85	0,4	4	1,5	4	0,1076	9,29	0,6501	0,3499
8	1,4	0,9	0,63	4	1,5	2	0,1118	8,946	0,7997	0,2003
9	1,45	0,9	1,0	4	1,75	2	0,119	8,406	0,7883	0,2117
10	1,5	0,95	1,25	5	1,75	3	0,1175	8,511	0,7029	0,2971
11	1,55	0,95	1,6	5	2,0	4	0,1202	8,318	0,6182	0,3818
12	1,6	1,0	2,5	5	2,0	5	0,131	7,634	0,5195	0,4805

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

Результаты моделирования показывают, что

1) Разработанная модель позволяет изменять 10 исходных параметров схемы с заданным диапазоном и в результате моделирования получить 12 вспомогательных и 4 основных показателя надежности: $\omega_{схемы}$, $T_{нар.отк}$, P и Q;

2) Возможно задание совокупности сочетаний вариантов исходных данных, изменение которых позволяет уменьшать значение $\omega_{схемы}$ и увеличивать $T_{нар.отк}$.

Заключение (Conclusions)

Проведенное исследование направлено на решение актуальной задачи повышения эффективности оценки и управления надежностью схем электроснабжения объектов. В работе представлено моделирование параметров надежности схем электроснабжения в среде *Matlab/Simulink*.

Основные результаты и выводы работы заключаются в следующем:

1) Разработана программа для моделирования параметров надежности схемы электроснабжения в среде *Matlab/Simulink*;

2) Проведены 12 вычислительных экспериментов на примере типовых схем электроснабжения с изменением исходных параметров;

3) Подтверждена практическая значимость исследования: разработанная модель позволяет оценивать параметры надежности схем различной конфигурации, оптимизировать сроки планово-предупредительных ремонтов (ППР) и обосновывать выбор резервирования на этапе проектирования и ввода в эксплуатацию СЭС.

В дальнейшем модель алгоритма расчета параметров надежности схемы электроснабжения в среде Matlab/Simulink рекомендуется использовать для:

1) Расширения библиотеки моделей для учета процессов износа и старения оборудования;

2) Интеграции модели надежности с моделями качества электроэнергии для комплексной оценки рисков;

3) Разработки оптимизационных алгоритмов для автоматического выбора рациональной конфигурации схемы с технико-экономическими составляющими по критерию «надежность-стоимость».

Результаты проведенных исследований могут быть рекомендованы для использования при проектировании систем электроснабжения. Внедрение разработанной модели в практику проектных и эксплуатационных работ позволит повысить эффективность эксплуатации электрических систем и управлять надежностью электроснабжения потребителей.

Литература

1. Виноградов А.В., Лансберг А.А., Волчков Ю.Д., Виноградова А.В. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2023. №2. С. 58-70.

2. Герасимов Д.О., Суслов К.В. СИСТЕМЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МУЛЬТИЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. №4 (48). С. 11-19.

3. Ибрагим М., Пантелеев В. И. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ MATLAB // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2023. №2. С. 212-227.

4. Моденов М.Ю., Чуканов А.Н., Цой Е.В. Математическое моделирование идеального контура управления летательным аппаратом нестандартного типа в среде MATLAB // Чебышевский сборник. 2025. №1 (97). С. 218-228.

5. Петров А.Р., Грачева Е.И., Абдуллазянов Э.Ю. Повышение точности оценки параметров надежности низковольтных коммутационных аппаратов, устанавливаемых в системах внутрицехового электроснабжения с учетом основных воздействующих факторов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 3. С. 38-52. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-38-52.

6. Петрова Р. М., Грачева Е. И. Алгоритмы оценки основных параметров надежности низковольтного оборудования схем цеховых сетей // Омский научный вестник. 2024. № 1 (189). С. 93–102. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-93-102.

7. Петрова Р. М. и др. Оценка параметров надежности схем внутризаводского 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>.

8. Петрова Р.М., Грачева Е.И. Оценка параметров надежности схем электроснабжения с трансформаторными подстанциями при выполнении технико-экономических расчетов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2025. Т. 17. № 2 (66). С. 3-18.

9. Романенко Н.Г., Головки Ю.А., Головки С.В., Ненастьяев Е.А. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НАСОСОМ ОХЛАЖДЕНИЯ ГЛАВНОГО ДИЗЕЛЯ В СРЕДЕ MATLAB SIMULINK // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2023. №2. С. 23-32.

10. Сагтаров Р.Р., Гарафутдинов Р.Р. ПРИМЕНЕНИЕ ВИРТУАЛЬНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ И ЕГО МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ MATLAB // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2024. №2. С. 55-67.

11. Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А., Петров А.Р., Грачева Е.И. Тепловизионный контроль электрооборудования промышленных предприятий // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 2. С. 68-77. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-68-77.

12. N. Bhuvaneshwary, V. J. Reddy, C. V. Kumar Reddy, J. R. Reddy, Y. Jagadeeshwar Reddy and M. U. Reddy, "Power Fault Analysis and Monitoring System using Simulink," 2025 5th International Conference on Trends in Material Science and Inventive Materials (ICTMIM), Kanyakumari, India, 2025, pp. 564-569, doi: 10.1109/ICTMIM65579.2025.10988264.

13. W. Guo, Y. He and X. Ling, "Modeling and Simulation of Intelligent Vehicle Systems Using Simulink and MATLAB Programming for Advanced Automotive Application," 2025 11th International Conference on Computing and Artificial Intelligence (ICCAI), Kyoto, Japan, 2025, pp. 627-631, doi: 10.1109/ICCAI66501.2025.00100.

14. S. Valtchev, R. M. Petrova, E. I. Gracheva, D. Gospodinova, T. Sinyukova and R. Miceli, "Electrical Supply Reliability of Circuits with Transformer Substations in Technical and Economic Decisions," 2025 7th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM), Bochum, Germany, 2025, pp. 623-628, doi: 10.1109/GPECOM65896.2025.11061870.

15. Y. Li, T. Chen, Y. She, W. Liao, C. Liu and M. Xie, "Energy Storage Regulation Strategy for 5G Base Stations Considering Power Supply Reliability," 2023 IEEE 7th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Hangzhou, China, 2023, pp. 1573-1578, doi: 10.1109/EI259745.2023.10513061.

16. Q. Yu et al., "Research on Online Pictures Recognition of Fault Scenario for Power Supply Reliability Management Based on Improved AI Algorithm," 2024 7th International Conference on Renewable Energy and Power Engineering (REPE), Beijing, China, 2024, pp. 190-194, doi: 10.1109/REPE62578.2024.10809893.

17. E. A. Panova and A. T. Nasibullin, "Development of Mathematical Models of Microprocessor-based Relay Protection Devices for 220/110 kV Nodal Distribution Substation in Matlab/Simulink," 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI), Magnitogorsk, Russia, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/PEAMI49900.2020.9234337.

18. V. A. Paseka, "Reliability Analysis of Transient Process and Steady State Calculations in MATLAB/Simulink," 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EICon), Saint Petersburg, Russian Federation, 2024, pp. 835-837, doi: 10.1109/EICon61730.2024.10468208.

Авторы публикации

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

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

References

1. Vinogradov A.V., Lansberg A.A., Volchkov Yu.D., Vinogradova A.V. DETERMINATION OF MODERN RELIABILITY INDICATORS OF RELAY PROTECTION AND AUTOMATION DEVICES // *Izvestiya vuzov. Energy problems*. 2023. № 2. Pp. 58-70.

2. Gerasimov D.O., Suslov K.V. SYSTEMS OF SIMULATION MODELING OF MULTI-ENERGY FACILITIES // *KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN*. 2020. № 4 (48). Pp. 11-19.

3. Ibrahim M., Pantelev V. I. MODELING OF AN ELECTRICAL COMPLEX OF A DC POWER TRANSMISSION LINE IN THE MATLAB SOFTWARE ENVIRONMENT // *Journal of the Siberian Federal University. Engineering and Technology*. 2023. № 2. Pp. 212-227.

4. Modenov M. Yu., Chukanov A. N., Tsoi E. V. Mathematical modeling of an ideal control loop for a non-standard type aircraft in the MATLAB environment // *Chebyshevsky collection*. 2025. № 1 (97). Pp. 218-228.

5. Petrov A.R., Gracheva E.I., Abdullazyanov E.Yu. Improving the accuracy of estimation of reliability parameters of low-voltage switching devices installed in the systems of inhouse power supply taking into account the main influencing factors. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (3):38-52. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-38-52.

6. Petrova R. M., Gracheva E. I. Algorithms for estimating the main reliability parameters of low-voltage equipment of shop-floor network schemes // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 1 (189). Pp. 93–102. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-93-102.

7. Petrova R. M. et al. Assessment of reliability parameters of in-house power supply schemes with two-transformer substations. *Bulletin of the Moscow State Technical University*. 2024. Vol. 27, No. 4. pp. 521-533. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-521-533>.

8. Petrova R.M., Gracheva E.I. Assessment of reliability parameters of power supply schemes with transformer substations during technical and economic calculations. KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN. 2025. Vol. 17. № 2 (66). Pp. 3-18.
9. Romanenko N.G., Golovko Yu.A., Golovko S.V., Nenasteyev E.A. MODELING OF THE CONTROL SYSTEM OF THE MAIN DIESEL COOLING PUMP IN THE MATLAB SIMULINK ENVIRONMENT // Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Control, Computer Engineering and Informatics. 2023. № 2. Pp. 23-32.
10. Sattarov R.R., Garafutdinov R.R. APPLICATION OF A VIRTUAL SYNCHRONOUS GENERATOR IN POWER SYSTEMS AND ITS MODELING IN THE MATLAB SOFTWARE PACKAGE // News of universities. Problems of energy supply. 2024. № 2. Pp. 55-67.
11. Shpiganovich A.N., Shpiganovich A.A., Petrov A.R., Gracheva E.I. Thermal imaging control of electrical equipment of industrial enterprises. Power engineering: research, equipment, technology. 2024; 26 (2): 68-77. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-68-77.
12. N. Bhuvaneshwary, V. J. Reddy, C. V. Kumar Reddy, J. R. Reddy, Y. Jagadeeshwar Reddy and M. U. Reddy, "Power Fault Analysis and Monitoring System using Simulink," 2025 5th International Conference on Trends in Material Science and Inventive Materials (ICTMIM), Kanyakumari, India, 2025, pp. 564-569, doi: 10.1109/ICTMIM65579.2025.10988264.
13. W. Guo, Y. He and X. Ling, "Modeling and Simulation of Intelligent Vehicle Systems Using Simulink and MATLAB Programming for Advanced Automotive Application," 2025 11th International Conference on Computing and Artificial Intelligence (ICCAI), Kyoto, Japan, 2025, pp. 627-631, doi: 10.1109/ICCAI66501.2025.00100.
14. S. Valtchev, R. M. Petrova, E. I. Gracheva, D. Gospodinova, T. Sinyukova and R. Miceli, "Electrical Supply Reliability of Circuits with Transformer Substations in Technical and Economic Decisions," 2025 7th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM), Bochum, Germany, 2025, pp. 623-628, doi: 10.1109/GPECOM65896.2025.11061870.
15. Y. Li, T. Chen, Y. She, W. Liao, C. Liu and M. Xie, "Energy Storage Regulation Strategy for 5G Base Stations Considering Power Supply Reliability," 2023 IEEE 7th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Hangzhou, China, 2023, pp. 1573-1578, doi: 10.1109/EI259745.2023.10513061.
16. Q. Yu et al., "Research on Online Pictures Recognition of Fault Scenario for Power Supply Reliability Management Based on Improved AI Algorithm," 2024 7th International Conference on Renewable Energy and Power Engineering (REPE), Beijing, China, 2024, pp. 190-194, doi: 10.1109/REPE62578.2024.10809893.
17. E. A. Panova and A. T. Nasibullin, "Development of Mathematical Models of Microprocessor-based Relay Protection Devices for 220/110 kV Nodal Distribution Substation in Matlab/Simulink," 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI), Magnitogorsk, Russia, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/PEAMI49900.2020.9234337.
18. V. A. Paseka, "Reliability Analysis of Transient Process and Steady State Calculations in MATLAB/Simulink," 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElCon), Saint Petersburg, Russian Federation, 2024, pp. 835-837, doi: 10.1109/ElCon61730.2024.10468208.

Authors of the publication

Renata M. Petrova –Kazan State Power Engineering University. <https://orcid.org/0009-0004-2508-8771>. 1998renata@mail.ru.

Elena I. Gracheva – Kazan State Power Engineering University. <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>. grachieva.i@bk.ru.

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Получено **20.10.2025 г.**

Отредактировано **14.11.2025 г.**

Принято **26.12.2025 г.**