

Научная статья

УДК 614.84:621.316.1; DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-31-39

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ ПЕРЕГРУЗКИ В ГОРОДСКИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

Полунин Георгий Александрович;

✉ **Таваров Саиджон Ширалиевич.**

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Россия

✉ tabarovsaid@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена исследованию влияния изменения режима работы бытовых электроприемников на состояние изоляции электропроводки, нарушение которой может приводить к возникновению пожароопасной ситуации. С применением имитационного моделирования в среде Matlab на основе уравнений теплового баланса построены модели тепловых процессов в проводнике. Полученная модель позволяет исследовать распределение температур внутри и на поверхности изолированного проводника. На основе результатов моделирования показано изменение тепловых характеристик при варьировании электрической нагрузки бытовых однофазных потребителей в условиях несимметрии. Получена зависимость времени достижения установившегося теплового режима от кратности выделяемого на поверхности проводника количества тепла и тока. Установлено, что при длительности протекания тока, превышающего допустимые значения (от 20 сек. и более), возникает риск термической деструкции изоляции, что создает условия для возникновения короткого замыкания и последующего пожара.

Ключевые слова: коммунально-бытовые электроприемники, тепловые процессы, пожарная безопасность, городские электрические сети, имитационное моделирование

Для цитирования: Полунин Г.А., Таваров С.Ш. Моделирование тепловых процессов при аварийных режимах перегрузки в городских распределительных сетях // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2026. № 2. С. 31–39. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-31-39

Scientific article

MODELING OF THERMAL PROCESSES DURING EMERGENCY OVERLOAD CONDITIONS IN URBAN DISTRIBUTION NETWORKS

Polunin Georgy A.;

✉ **Tavarov Saidjon Sh.**

South Ural State University (national research university), Chelyabinsk, Russia

✉ tabarovsaid@mail.ru

Abstract. The article is devoted to the study of the influence of changes in the operating mode of household electrical appliances on the state of wiring insulation, the damage of which can lead to fire hazards. Using simulation modeling in the Matlab environment based on heat balance equations, models of thermal processes in a conductor were developed. The resulting model allows for the investigation of temperature distribution both inside and on the surface of an insulated conductor. Based on the simulation results, changes in thermal characteristics are shown when varying the electrical load of household single-phase consumers under unbalanced conditions. The dependence of the time to reach a steady-state thermal regime on the ratio of heat dissipation on the conductor surface and the current ratio was obtained.

© Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2026

It was established that when the duration of the current flow exceeds permissible values (20 seconds or more), there is a risk of thermal degradation of the insulation, which creates conditions for a short circuit and a subsequent fire.

Keywords: household electrical appliances, thermal processes, fire safety, urban electrical networks, simulation modeling

For citation: Polunin G.A., Tavarov S.Sh. Modeling of thermal processes during emergency overload conditions in urban distribution networks // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2026. № 2. P. 31–39. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-31-39

Введение

Коммунально-бытовые сети характеризуются разнообразной нагрузкой, включающей осветительные установки, бытовые приборы и климатическое оборудование. Преобладание однофазных приемников приводит к несимметричной нагрузке отдельных фаз, что необходимо учитывать при проведении пожарно-технической экспертизы. Важной особенностью экспертизы является применение расчетных методов для установления очага пожара и выявления причинно-следственных связей. В частности, зависимость выделения количества тепла от времени достижения критических температур изоляции позволяет обосновать электротехническую причину пожара.

Коммунально-бытовые сети имеют особенное распределение электроэнергии до потребителей. От ячейки подстанции по линии электропередачи напряжением 10 кВ подводится питание до потребительской трансформаторной подстанции напряжением 10/0,4 кВ. Далее с потребительской трансформаторной подстанции по кабельной линии (трёхфазной четырёхжильной) подводится питание до вводно распределительного устройства.

После этого равномерно (симметрично) по фазам распределяется нагрузка в зависимости от обеспеченности дополнительными источниками потребителей (газоснабжения, теплогорячего водоснабжения) согласно [1]. Таким образом задаётся проектная удельная электрическая нагрузка на одного потребителя, исходя из которой при проектировании распределяются нагрузки по фазам. При этом несимметрия в сети не должна превышать установленные нормы [2, 3] на 2 % и 4 %.

Результаты исследования и их обсуждение

Для исследования влияния режима работы бытовых электроприемников была построена трехфазная модель распределительной сети напряжением 380 В (рис. 1). Эта модель была построена в среде Matlab для исследования влияния режима работы бытовых электроприемников на состояние изоляции электропроводки в коммунально-бытовых сетях. Модель включает источник питания, трансформатор, измеритель параметров, блок тепловых процессов, бытовую электрическую нагрузку и осциллограф.

Моделирование тепловой энергии на поверхности проводника реализовано в среде Matlab в виде блока тепловых процессов (рис. 2). Этот блок основан на уравнениях теплового баланса и позволяет исследовать распределение температур внутри и на поверхности изолированного проводника. Блок использует входные данные, такие как ток, температура окружающей среды, и внутренние параметры (Current_in, Ambient and Wire Temp_in) для расчета выделения тепла и температуры проводника и алгоритма управления (рис. 3). В ходе исследования на основе этого алгоритма и компьютерной модели были получены данные, позволяющие установить зависимость выделения количества теплоты от времени действия пожароопасного режима (перегрузки).

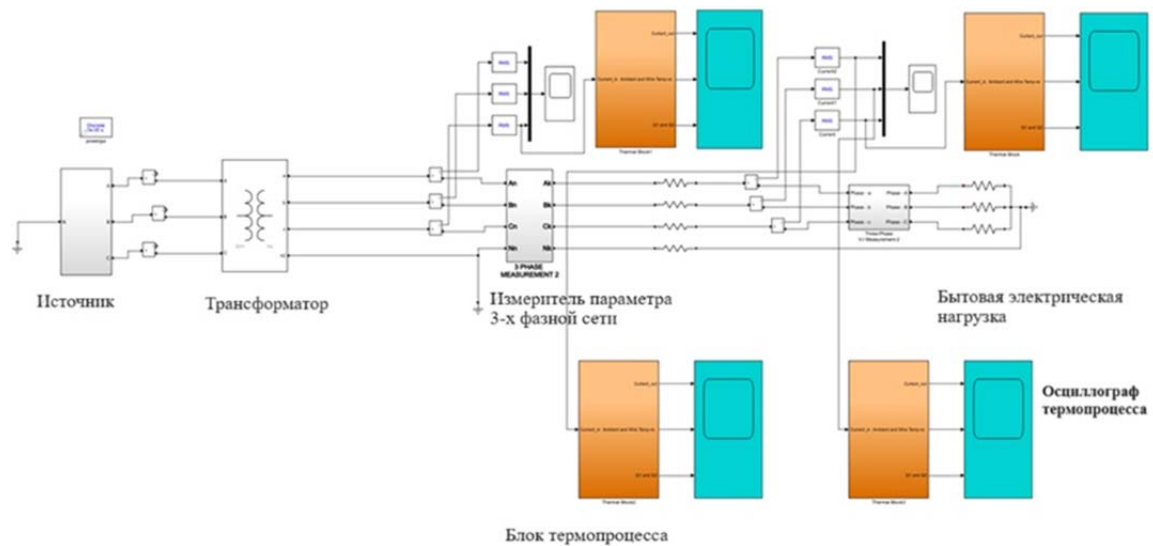


Рис. 1. Трехфазная модель распределительной сети напряжением 380 В

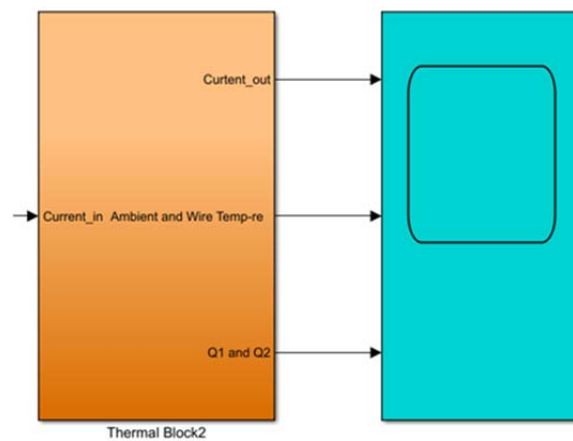


Рис. 2. Блок моделирования тепловых процессов

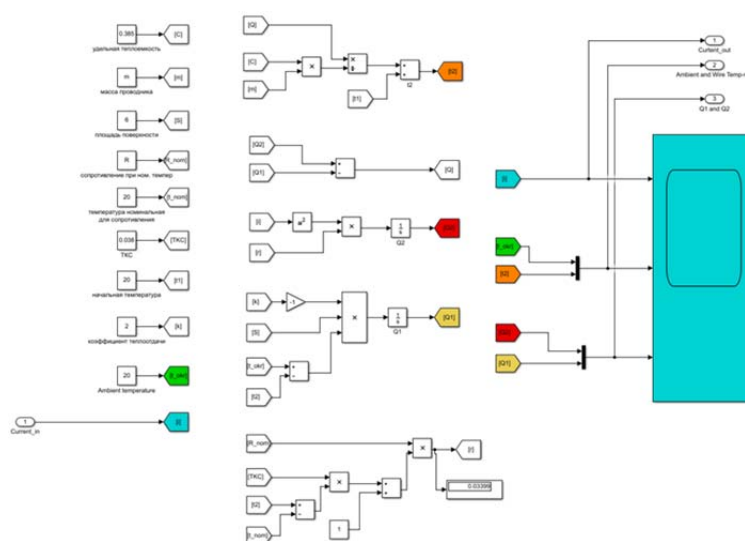


Рис. 3. Алгоритм управления блока моделирования тепловых процессов

В основу расчетов положены уравнения теплового баланса, описывающие нагрев проводника и теплоотдачу в окружающую среду:

$$P \cdot dt = m \cdot c \cdot d\tau + k \cdot F \cdot (\tau - \tau_{\text{окр.}}) \cdot dt,$$

где: P – мощность тепловыделения в проводнике при протекании электрического тока, Вт; dt – бесконечно малый интервал времени, в течение которого происходит процесс, с; m – масса нагреваемого тела (токоведущей жилы), кг; c – удельная теплоемкость материала проводника (для меди $c \approx 385 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $d\tau$ – изменение температуры проводника за время dt , К (или $^{\circ}\text{C}$); k – коэффициент теплоотдачи от поверхности проводника в окружающую среду, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; F – площадь поверхности охлаждения проводника, м^2 ; τ – текущая температура проводника в данный момент времени, К (или $^{\circ}\text{C}$); $\tau_{\text{окр.}}$ – температура окружающей среды, К (или $^{\circ}\text{C}$); $(\tau - \tau_{\text{окр.}})$ – температурный напор (разность температур между проводником и средой), К (или $^{\circ}\text{C}$).

Расчет сопротивления провода проводился с учетом температурного коэффициента меди по формуле:

$$r = R_{\text{ном}} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T),$$

где: r – фактическое электрическое сопротивление проводника при текущей температуре, Ом; $R_{\text{ном}}$ – номинальное (начальное) сопротивление проводника при базовой температуре (обычно при 20°C), Ом; α – температурный коэффициент электрического сопротивления материала (для меди $\alpha \approx 0,004 \text{ K}^{-1}$), характеризует относительное изменение сопротивления при изменении температуры на один градус; ΔT – изменение температуры проводника относительно базового значения ($T_{\text{текущ}} - T_{\text{базовая}}$), $^{\circ}\text{C}$ или K .

В ходе исследования на компьютерной модели получены данные (таблица), позволяющие установить зависимость выделения количества теплоты от времени действия пожароопасного режима (перегрузки).

Таблица

**Расчетные данные теплового режима
при увеличении нагрузки на 10 %, 20 %, 50 % и 80 % (Matlab)**

Отклонение от допустимой величины, %	Фактическая нагрузка, кВт	Допустимая нагрузка, кВт	Количество выделяемой энергии Q , Дж	Время процесса, сек.
10	11	10	$0,2 \cdot 10^5$	6,4
20	12	10	$0,32 \cdot 10^5$	9,5
50	15	10	$0,55 \cdot 10^5$	9,5
80	18	10	$2 \cdot 10^5$	24,3

В зависимости от фактической нагрузки квартир определяется сила тока, преобладающая в сети в установившемся режиме [4–6].

Согласно закону Джоуля-Ленца, время протекания аварийного режима рассчитывается как:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot \tau,$$

$$\tau = \frac{Q}{I^2 \cdot R}.$$

Расчетное время протекания аварийного режима работы сети не только отвечает на вопросы пожарно-технической экспертизы, но и способствует выявлению преднамеренных признаков развития пожароопасного режима работы сети, проявляющегося в изменении структуры изоляции под действием токовых нагрузок.

Величины токов, при которых температура достигает максимального значения, в электротехнике известны как длительно допустимые токовые нагрузки для кабелей и проводов.

Срабатывание при достаточно большом токе обеспечивает протекание остаточного тока, кроме того, проектная нагрузка не учитывает особенности потребительского оснащения. Это ряд тех случаев, где не учитываются условия кондиционирования, наличие теплого пола и различных мощных электроприемников. Установленные параметры времени и токовые характеристики не способствуют решению важнейших задач при расследовании пожаров. Стоит отметить, что разрушение изоляции в коммунально-бытовых сетях путем нагревания проводников выделяемой энергией и протеканием сверхтока в проводнике контролировать силой тока не предоставляется возможным.

Время-токовая характеристика (характеристика расцепления) выключателя определяется условиями и значениями согласно характеристикам автомата защиты [7–11] и должна учитываться при расследовании пожара совместно с другими расчётными параметрами.

В таком случае, путем модели трёхфазной распределительной сети (описанной выше), были установлены параметры выделяющегося количества тепла при различных нагрузках в сети, где далее были рассчитаны временные характеристики протекания данного пожароопасного режима работы сети (табл.).

На рис. 4 представлен график зависимости времени достижения установившегося теплового режима от количества выделяемой энергии. Данная зависимость позволяет оценить степень термического воздействия на кабельную сеть при проведении экспертизы.

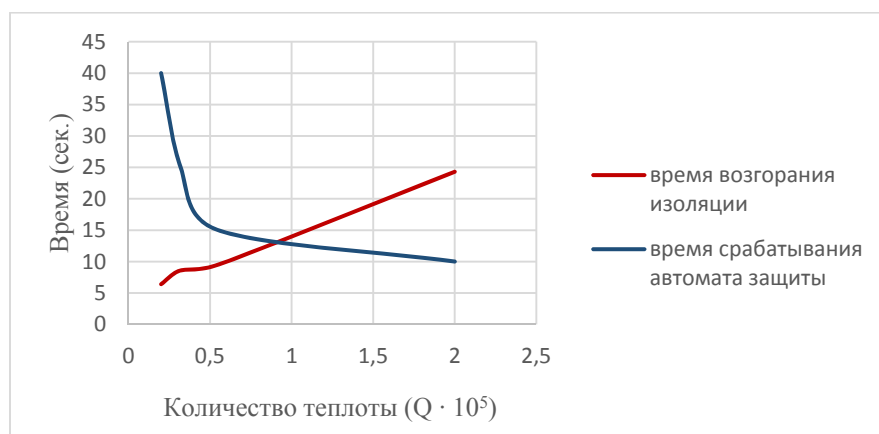


Рис. 4. График зависимости времени достижения установившегося теплового режима от количества выделяемой энергии

Для защиты сетей от сверхтоков используются автоматические выключатели. Согласно актуальному ГОСТ ИЕС 60898-1-2020, устройства класса В срабатывают при превышении номинального тока в 3–5 раз.

На рис. 5 приведено сравнение времени срабатывания защиты и времени достижения критического нагрева по кратности тока и тепла. Установлено, что при длительных перегрузках (более 20 сек.) тепловая энергия приводит к потере диэлектрических свойств изоляции, что является предвестником короткого замыкания.

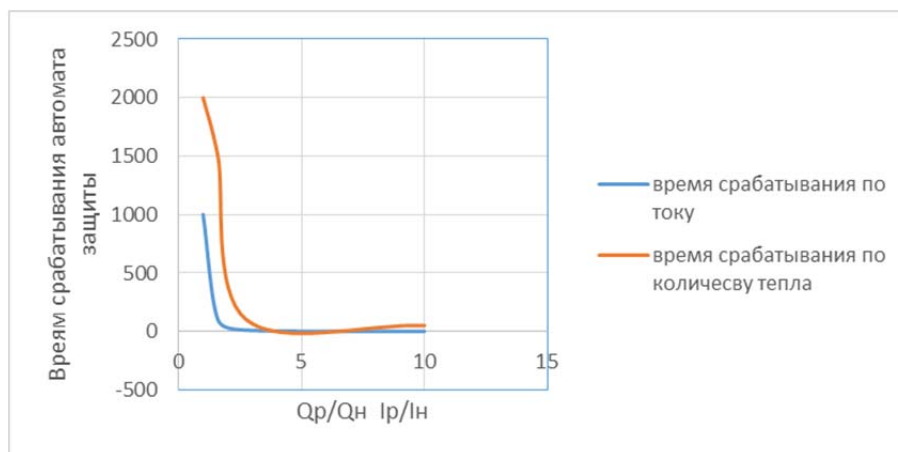


Рис. 5. Сравнение время-токовой характеристики срабатывания защиты и времени достижения критического нагрева по кратности тока и количества тепла

Именно данный тип отключается, если в момент повышения нагрузки значение силы тока превышает номинальное не более чем в 3–5 раза.

Согласно паспорту автоматического выключателя [10], определяющего время отключения автомата, строится зависимость в отношении кратности выделяющегося количества тепла и времени отключения автомата (рис. 5).

Здесь устанавливается, что, чем больше будет перегрузка (выделяемый ток), тем время срабатывания будет меньше. Это говорит о том, что в проводнике возникает достаточно большое выделение количества теплоты, следовательно, это может послужить причиной разрушения изоляции и потери свойств изоляционных материалов. При этом из-за длительности протекания тока (от 20 сек. и более) имеется вероятность возникновения короткого замыкания, что в последующем приведёт к пожару.

Далее приведен пример расчета величин для медного проводника сечением $2,5 \text{ мм}^2$ (наиболее распространенного в бытовых сетях) при нагрузке, превышающей номинальную.

Пример расчета параметров уравнения теплового баланса:

Для медного провода длиной $L=1 \text{ м}$ и сечением $S = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$:

1. Мощность тепловыделения (P).

Номинальный режим $I = 19 \text{ А}$ и удельное сопротивление меди $\rho = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S} = 0,0175 \cdot \frac{1}{2,5} = 0,007 \text{ Ом},$$

$$P = I^2 \cdot R = 19^2 \cdot 0,007 = 2,53 \text{ Вт/м}.$$

2. Масса проводника (m).

Плотность меди $\gamma = 8900 \text{ кг/м}^3$:

$$m = \gamma \cdot S \cdot L = 8900 \cdot 2,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1 = 0,02225 \text{ кг/м}.$$

3. Удельная теплоемкость (c).

Для меди табличное значение составляет:

$$c \approx 385 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}).$$

4. Коэффициент теплоотдачи (k) и площадь поверхности (F).

Для изолированного провода в спокойном воздухе коэффициент теплоотдачи $k \approx 10 \dots 15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

Диаметр жилы $d \approx 1,78$ мм, с учетом изоляции наружный диаметр $D \approx 3,4$ мм.

$$F = \pi \cdot D \cdot L = 3,14 \cdot 0,0034 \cdot 1 = 0,0107 \text{ м}^2/\text{м}.$$

Анализ установившейся температуры.

В установившемся режиме ($d\tau = 0$) вся выделяемая мощность уходит в окружающую среду:

$$P = k \cdot F \cdot (\tau - \tau_{\text{окр.}}).$$

Отсюда температура перегрева при $k = 12 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ и $\tau_{\text{окр.}} = 20 ^\circ\text{C}$:

$$\tau = \tau_{\text{окр.}} + \frac{P}{k \cdot F} = 20 + \frac{2,53}{12 \cdot 0,0107} = 40 ^\circ\text{C}.$$

Результат: режим безопасен для ПВХ-изоляции (допустимый нагрев до $+70 ^\circ\text{C}$).

5. Режим перегрузки при несимметрии ($I = 45 \text{ A}$).

Мощность тепловыделения ($P \approx 14,2 \text{ Вт}/\text{м}$).

Температура жилы:

$$\tau = 20 + \frac{14,2}{12 \cdot 0,0107} \approx 130 ^\circ\text{C}.$$

Результат: температура превышает критический предел деформации изоляции ($+80 \dots +100 ^\circ\text{C}$). При сохранении такого режима в течение 24,3 сек. (табл.) происходит термическая деструкция диэлектрика.

Заключение

На основе разработанной модели тепловых процессов проведены исследования влияния несимметрии нагрузки на температурные режимы проводников до достижения установившегося нагрева.

Полученные зависимости позволяют определить время достижения критических температур изоляции в зависимости от кратности выделяемой энергии, что необходимо для идентификации технической причины пожара.

Показано, что при длительности протекания тока сверх допустимых значений (от 20 сек. и более) возникает высокая вероятность необратимой деструкции изоляции, создающая условия для возникновения пожароопасной ситуации.

Список источников

1. СП 54.13330.2016. Здания жилые многоквартирные. Актуализированная редакция СНиП 31-01-2003 (утв. приказом Минстроя России от 3 дек. 2016 г. № 883/пр). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

2. ГОСТ 22483–2012. Жилы токопроводящие для кабелей, проводов и шнуров: межгосударственный стандарт. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

3. ГОСТ 31996–2012. Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение 0,66; 1 и 3 кВ: межгосударственные. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

4. Разработка виртуального тренажера исследования признаков аварийных режимов работы электрических приборов и оборудования / И.Н. Пожаркова [и др.] // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2022. № 3 (26). С. 48–54. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2022.52.17.008

5. Оморов Т.Т., Тақырбашев Б.К., Осмонова Р.Ч. К проблеме математического моделирования трехфазной несимметричной распределительной сети // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 1. С. 93–102. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-1-93-102

6. Гринкруг М.С., Митин И.А. Управление несимметрией токов в распределительных сетях низкого напряжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2009. № 3-4. С. 80–84.

7. Валиуллин К.Р., Тушев С.И. Математическая модель изменения тока короткого замыкания с учётом нагрева проводника // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. № 5. С. 458–466. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-5-458-467

8. Степанов В.М., Базыль И.М., Ключникова А.Ю. Повышение эффективности работы электрических сетей за счет снижения несимметрии напряжения // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. № 12. С. 8–11. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-8-12

9. Технический паспорт выключателя автоматического серии ВА 47-29. М.: Торговый дом «Сфера». 4 с.

10. ГОСТ ИЕС 60898-1-2020. Выключатели автоматические для защиты от сверхтоков бытового и аналогичного назначения. Часть 1. Выключатели автоматические для переменного тока: межгосударственный стандарт. М.: Стандартинформ, 2020. 110 с.

11. Петрова Н.В., Лобова С.Ф., Гайдукевич А.Е. Анализ влияния несоблюдения противопожарных расстояний на распространение горения при производстве судебных нормативных пожарно-технических экспертиз // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2022. № 2 (25). С. 24–30.

References

1. SP 54.13330.2016. Zdaniya zhilye mnogokvartirnye. Aktualizirovannaya redakciya SNIp 31-01-2003 (utv. prikazom Ministroya Rossii ot 3 dek. 2016 g. № 883/pr). Dostup iz sprav.-pravovoj sistemy «Konsul'tantPlyus».

2. GOST 22483–2012. Zhily tokoprovodyashchie dlya kabelej, provodov i shnurov: mezhgosudarstvennyj standart. Dostup iz sprav.-pravovoj sistemy «Konsul'tantPlyus».

3. GOST 31996–2012. Kabeli silovye s plastmassovoj izolyaciej na nominal'noe napryazhenie 0,66; 1 i 3 kV: mezhgosudarstvennyj standart. Dostup iz sprav.-pravovoj sistemy «Konsul'tantPlyus».

4. Razrabotka virtual'nogo trenazhera issledovaniya priznakov avarijnyh rezhimov raboty elektricheskix priborov i oborudovaniya / I.N. Pozharkova [i dr.] // Sibirskij požarno-spasatel'nyj vestnik. 2022. № 3 (26). S. 48–54. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2022.52.17.008

5. Оморов Т.Т., Тақырбашев Б.К., Осмонова Р.Ч. К проблеме математического моделирования трехфазной несимметричной распределительной сети // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 1. С. 93–102. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-1-93-102

6. Гринкруг М.С., Митин И.А. Управление несимметрией токов в распределительных сетях низкого напряжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2009. № 3-4. С. 80–84.

7. Валиуллин К.Р., Тушев С.И. Математическая модель изменения тока короткого замыкания с учётом нагрева проводника // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. № 5. С. 458–466. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-5-458-467

8. Степанов В.М., Базыль И.М., Ключникова А.Ю. Повышение эффективности работы электрических сетей за счет снижения несимметрии напряжения // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. № 12. С. 8–11. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-8-12

9. Технический паспорт выключателя автоматического серии ВА 47-29. М.: Торговый дом «Сфера». 4 с.

10. GOST IEC 60898-1-2020. Vyklyuchateli avtomaticheskie dlya zashchity ot sverhtokov bytovogo i analogichnogo naznacheniya. Chast' 1. Vyklyuchateli avtomaticheskie dlya peremennogo toka: mezhgosudarstvennyj standart. M.: Standartinform, 2020. 110 s.

11. Petrova N.V., Lobova S.F., Gajdukevich A.E. Analiz vliyaniya nesoblyudeniya protivopozharnyh rasstoyanij na rasprostranenie goreniya pri proizvodstve sudebnyh normativnyh pozharo-tekhnicheskikh ekspertiz // Sibirskij pozharo-spasatel'nyj vestnik. 2022. № 2 (25). S. 24–30.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 23.02.2026; одобрена после рецензирования: 17.04.2026; принята к публикации: 21.04.2026

Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 23.02.2026; approved after review: 17.04.2026; accepted for publication: 21.04.2026

Информация об авторах:

Полунин Георгий Александрович, доцент кафедры безопасность жизнедеятельности Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета) (454080, г. Челябинск, пр. Ленина, д. 76), кандидат технических наук, <https://orcid.org/0000-0001-5024-6728>

Таваров Саиджон Ширалиевич, доцент кафедры безопасность жизнедеятельности Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета) (454080, г. Челябинск, пр. Ленина, д. 76), кандидат технических наук, доцент, e-mail: tabarovsaid@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2875-2752>

Information about authors:

Polunin Georgy A., associate professor of the department of life safety of South Ural State University (national research university) (454080, Chelyabinsk, Lenin ave., 76), candidate of technical sciences, <https://orcid.org/0000-0001-5024-6728>

Tavarov Saidjon Sh., associate professor of the department of life safety of South Ural State University (national research university) (454080, Chelyabinsk, Lenin ave., 76), candidate of technical sciences, associate professor, e-mail: tabarovsaid@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2875-2752>