

Научная статья

УДК 614.841.24; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-165-175

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ПРОВОДОВ И КАБЕЛЕЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ЗАЩИТЫ

✉ Козлова Юлия Сергеевна.

Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск, Россия

✉ y_kozlova@ugrasu.ru

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена тем, что в распределительных сетях 0,4 кВ ток в нулевом рабочем проводнике формируется двумя составляющими: током нулевой последовательности основной частоты, обусловленным несимметрией нагрузок, и суммой высших гармоник, кратных трем, генерируемых однофазными нелинейными потребителями. В условиях высокой плотности нелинейной нагрузки действующее значение тока в нулевом рабочем проводе может превышать фазные токи, что создает риск недопустимого нагрева изоляции и образования потенциальных источников зажигания. Существующие системы защиты и мониторинга контролируют либо только превышение токовой уставки, либо обрыв N-проводника. Тепловое состояние изоляции при этом оценивается косвенно и с большой погрешностью, так как эквивалентное сопротивление проводника на высших гармониках возрастает, а допустимая токовая нагрузка, нормированная для синусоидального режима, становится некорректной. В то же время значения температур для различных типов изоляции строго нормированы, что позволяет перейти к оценке фактического состояния изоляции по анализу токовых нагрузок.

В настоящей статье представлена методика оценки теплового состояния проводов и кабелей, базирующаяся на анализе параметров фазных токов, что позволяет учитывать определяющее влияние режимов эксплуатации на пожароопасность объектов защиты. Методика предполагает использование параметров фазных токов для косвенной оценки тепловых процессов в проводке, что обеспечивает контроль текущего состояния сети без необходимости прямого измерения температуры.

Научная новизна полученных результатов заключается в систематизации расчетных зависимостей в единую методику, адаптированную для оценки пожарной опасности объектов защиты при возникновении токовой перегрузки. Практические рекомендации по использованию разработанного алгоритма сводятся к его интеграции в существующие системы автоматизированного учета электроэнергии для выполнения анализа теплового состояния кабельных линий и проводки при отсутствии стационарных систем мониторинга.

Ключевые слова: пожарная безопасность, электропроводка, перегрузка, старение изоляции, низковольтные сети

Для цитирования: Козлова Ю.С. Методика оценки теплового состояния проводов и кабелей для обеспечения пожарной безопасности объектов защиты // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 2 (78). С. 165–175. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-165-175

Scientific article

A METHODOLOGY FOR ASSESSING THE THERMAL CONDITION OF WIRES AND CABLES TO ENSURE FIRE SAFETY OF PROTECTED FACILITIES

✉ Kozlova Yuliya S.

Ugra state university, Khanty-Mansiysk, Russia

✉ y_kozlova@ugrasu.ru

Abstract. The relevance of the study is determined by the fact that in 0,4 kV distribution networks, the current in the neutral conductor is formed by two components: the zero-sequence current at the fundamental frequency, caused by load asymmetry, and the sum of higher harmonics that are multiples of three, generated by single-phase nonlinear consumers. Under conditions of a high density of nonlinear loads, the effective value of the current in the neutral conductor may exceed the phase currents, creating a risk of unacceptable insulation heating and the formation of potential ignition sources. Existing protection and monitoring systems typically either detect only exceedances of the current setpoint or a break in the neutral conductor. The thermal state of the insulation is assessed indirectly and with significant error, since the equivalent resistance of the conductor increases at higher harmonics, rendering the permissible current load, standardized for sinusoidal conditions, inaccurate. At the same time, temperature values for different types of insulation are strictly standardized, allowing for an assessment of the actual insulation condition based on an analysis of current loads. This article presents a methodology for assessing the thermal state of wires and cables based on the analysis of phase current parameters, which allows for the determining influence of operating modes on the fire hazard of protected facilities. The methodology utilizes phase current parameters to indirectly assess thermal processes in wiring, enabling monitoring of the current network state without the need for direct temperature measurements. The scientific novelty of the obtained results lies in the systematization of the calculated dependencies into a unified methodology adapted for assessing the fire hazard of protected facilities during a current overload. Practical recommendations for using the developed algorithm include its integration into existing automated electricity metering systems for analyzing the thermal state of cable lines and wiring in the absence of dedicated monitoring systems.

Keywords: fire safety, electrical wiring, overload, insulation aging, low-voltage networks

For citation: Kozlova Yu.S. A methodology for assessing the thermal condition of wires and cables to ensure fire safety of protected facilities // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 2 (78). P. 165–175. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-165-175

Введение

Статистика пожаров, обусловленных причинами электротехнического характера, демонстрирует устойчивую негативную динамику и свидетельствует о высокой актуальности задач повышения надежности и безопасности систем электроснабжения. Согласно результатам анализа официальных статистических данных, представленных в [1], в период с 2019 по 2024 г. количество возгораний, связанных с нарушением правил устройства и эксплуатации электрооборудования, возросло с 49 638 до 64 795 случаев, и на 2024 г. составило 18,6 % от общего числа пожаров по стране. Рис. 1–3 отражают динамику ключевых показателей пожарной статистики за рассматриваемый период.

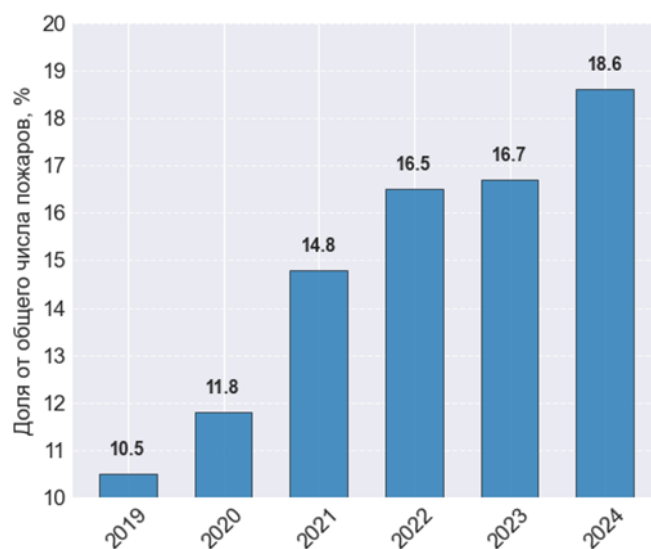


Рис. 1. Пожары по причинам электротехнического характера

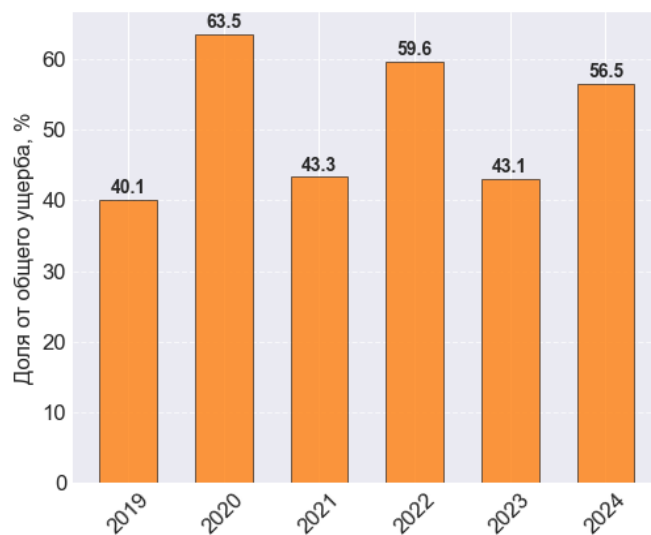


Рис. 2. Ущерб от пожаров по причинам электротехнического характера

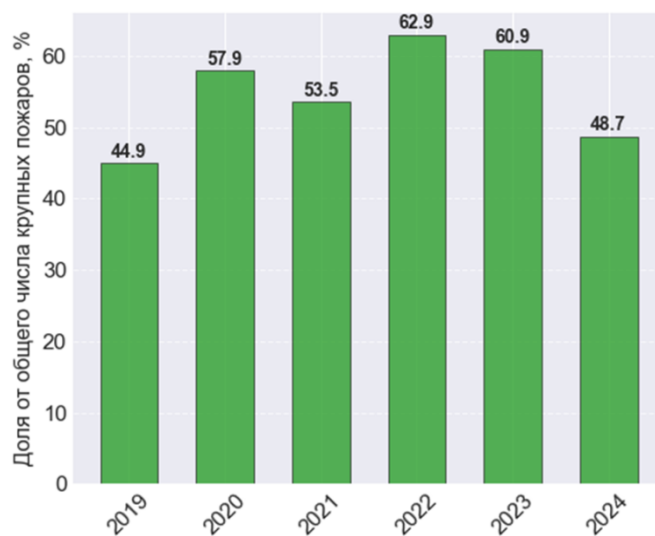


Рис. 3. Крупные пожары по причинам электротехнического характера

Доля пожаров по причинам электротехнического характера ежегодно фиксируется на достаточно высоком уровне. Показатели доли ущерба и доли крупных пожаров по данной причине не имеют выраженной динамики, что может быть обусловлено актуализацией методик расчета ущерба и критериев отнесения пожаров к категории крупных, а также иными причинами.

Особого внимания заслуживает тот факт, что в структуре самих электротехнических причин доминирующее положение занимают кабели и провода. Данные [1] позволяют квалифицировать кабели и провода как наиболее опасный вид электротехнических изделий, что подтверждается и современными исследованиями пожароопасности электропроводок [2–3]. Приоритетные направления исследований связаны с изучением свойств изоляции проводника: ее химического состава, конструктивного исполнения, тепловыделения при горении, сопровождающегося выделением высокотоксичных веществ, а также влияния внешних параметров [4–6]. Однако, несмотря на весомый вклад указанных исследований в понимание проблемы и высокую степень их научной значимости, принципиального улучшения статистики пожаров не наблюдается. Следует в то же время отметить, что параметры электрического режима работы сети, зачастую остающиеся за рамками оценочных критериев, оказывает непосредственное воздействие на состояние изоляции проводников и, как следствие, процесс возникновения и развития пожара.

Современная структура электропотребления жилых и общественных зданий в последние десятилетия претерпевает качественные изменения. Широкое внедрение импульсных источников питания компьютерной техники, офисного оборудования и светодиодного освещения привело к тому, что доля нелинейных нагрузок в сетях достигает 60–80 % [7–8]. Ключевой особенностью таких потребителей является генерация высших гармоник тока, кратных трем (преимущественно 3-й гармоники 150 Гц), которые суммируются в нейтральном проводнике трехфазной сети [8].

Современные нормативные документы содержат указания по учету несинусоидальности токов и введению поправочных коэффициентов при выборе сечения нейтрали. Однако сложившиеся подходы к проектированию остаются преимущественно статическими. Выбор сечения кабеля производится на этапе проектирования исходя из предполагаемого состава нагрузки, в то время как в процессе эксплуатации зданий характер потребления и коэффициент нелинейных искажений могут нелинейно меняться, многократно превышая расчетные значения.

Традиционные методы защиты и выбора сечений жил проводов и кабелей опираются на стационарные тепловые режимы. В реальности же высокая нелинейность в сочетании с нестационарностью создает кратковременные, но регулярные тепловые перегрузки [9–10]. Из-за значительной тепловой инерции проводников эти пики не приводят к немедленному отказу, но инициируют процессы накопительной деградации изоляции.

Существующая нормативная база не учитывает накопленный перегрев кабеля при таких динамических воздействиях, а в условиях, когда доля нелинейных нагрузок значительна, заложенные коэффициенты запаса становятся недостаточными для компенсации ускоренного старения диэлектрика. Это обуславливает необходимость перехода от статического выбора сечений к алгоритмам предиктивного мониторинга, способным в реальном времени анализировать спектр токов и прогнозировать фактический износ изоляции нейтрального проводника.

Научные исследования последних лет также подтверждают, что традиционный статический расчет сечений жил по таблицам не гарантирует термическую стойкость кабеля [11–12]. Существующие методы контроля температуры трудозатратны и труднореализуемы на существующих объектах защиты. Это обуславливает необходимость создания математических моделей термометрирования.

Целью данной статьи является разработка методики косвенного восстановления температурного профиля нейтрального проводника на основе вейвлет-анализа массивов фазных токов и динамического моделирования тепловых процессов.

Сложность рассматриваемого процесса обусловлена его динамичностью и стохастичностью. Уровень гармоник и несимметрии меняется в течение суток и зависит от состава включенного оборудования. Традиционные методы проверки по допустимому току, основанные на статических таблицах, не способны учесть реальный тепловой режим с переменной нагрузкой. Тепловая инерционность кабеля приводит к тому, что кратковременные превышения тока могут не вызывать критического нагрева, в то время как длительные перегрузки даже с небольшим превышением приводят к недопустимому росту температуры. Для достоверной оценки рисков термических нарушений необходимо применение численного моделирования, учитывающего вероятностный характер нагрузки, нелинейную зависимость тепловыделения от тока и динамику нагрева и остывания.

Методология

Методология исследования строится на обосновании необходимости сочетания методов цифровой обработки сигналов и вычислительной термодинамики. Для идентификации гармонического состава токов предлагается использование аппарата пакетного вейвлет-разложения, обладающего высокой разрешающей способностью в частотно-временной области. Теплофизическая часть исследования базируется на теории нагрева проводников при несинусоидальных режимах, реализованной через итерационные численные методы.

В основе исследования лежит концепция косвенного восстановления температурного профиля нейтрального проводника без использования прямых температурных датчиков. Входными данными служат массивы мгновенных значений фазных токов. Для выделения информативного сигнала используется пакетная вейвлет-декомпозиция, позволяющая сохранять временную локализацию искажений, что критично при анализе случайных включений нагрузок. Методология предполагает расчет тока в нулевом проводе не как прямое измерение, а как аналитическую сумму двух физических явлений: несимметрии, обусловленной неравномерным распределением однофазных потребителей, и несинусоидальностью ввиду нелинейности вольт-амперных характеристик нагрузок.

Для трансформации полученных токовых профилей в температурные зависимости применяется численное решение дифференциального уравнения теплопроводности методом Эйлера. Математическая модель учитывает итерационное изменение активного сопротивления жилы в зависимости от ее мгновенной температуры, что позволяет зафиксировать эффекты термического разгона, недоступные для стандартных табличных расчетов. Завершающим этапом является расчет накопленного износа с использованием модели Аррениуса и правила Монтзингера, трансформирующих температурный профиль в эквивалентное время старения диэлектрика. Это позволяет оценить ущерб от перегрузки нейтрали даже в тех случаях, когда температура не достигла точки немедленного пробоя.

Результаты и их обсуждение

Для реализации алгоритма мониторинга теплового состояния предлагается концептуальная методика, основные этапы которой отражены на рис. 4.

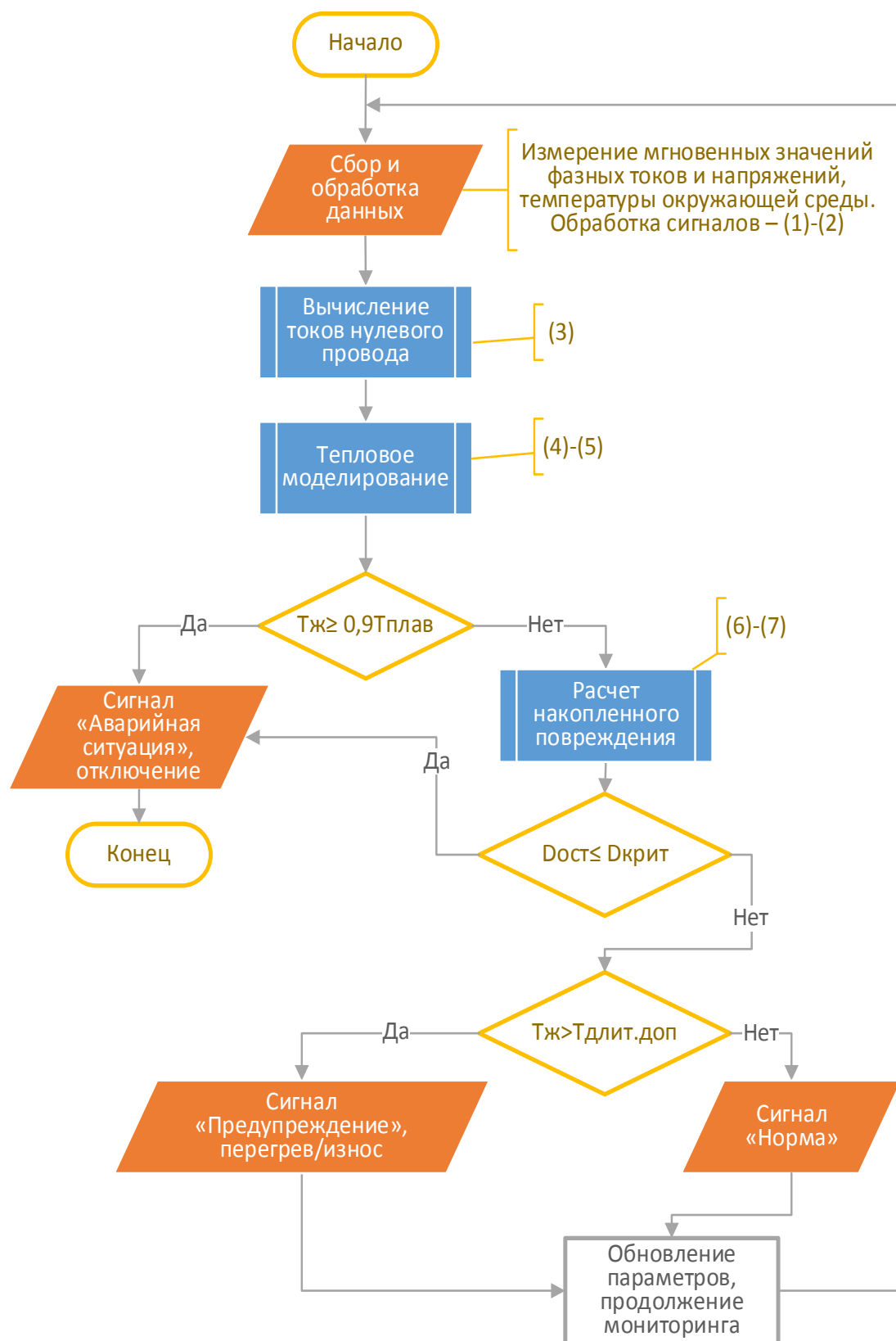


Рис. 4. Методика расчета теплового состояния проводника

На этапе сбора и обработки данных сигнал тока каждой фазы $i(t)$ на уровне разложения j представляется в виде:

$$i(t) = \sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_k W_{j,n}(k) \psi_{j,n,k}(t),$$

где $W_{j,n}(k)$ – вейвлет-коэффициенты узла n на уровне разложения j ; $\psi_{j,n,k}(t)$ – базисная функция вейвлета.

Действующее значение тока в n -м частотном узле:

$$I_{\text{узел}_n} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [W_{j,n}(k)]^2},$$

где $I_{\text{узел}_n}$ – действующее значение тока в n -м узле, А; N – количество отсчетов в окне анализа.

Переход от узловых значений $I_{\text{узел}_n}$ к селективным значениям гармоник фаз позволяет определить результирующий ток в нулевом проводе:

$$I_N = \sqrt{I_{0(50)}^2 + \sum_{h=3,9,\dots} I_{0(h)}^2}, \quad (1)$$

где $I_{0(50)}$ – действующее значение тока несимметрии основной частоты, А; $I_{0(h)}$ – действующее значение гармоник, кратных трем.

Вид формулы (1) обосновывается тем, что основную токовую нагрузку на нулевой рабочий провод в четырехпроводной сети создают токи нулевой последовательности основной частоты и токи высших нечетных гармоник, кратных трем [13].

Температура жилы $T_i(t)$ определяется из уравнения теплового баланса:

$$(I_N(t))^2 \cdot R(T(t)) = C \frac{dT_i}{dt} + \frac{T_i(t) - T_{\text{окр}}(t)}{R_T},$$

где $R(T(t))$ – активное сопротивление материала проводника, зависящее от температуры, Ом; C – аддитивная теплоемкость, Дж/°С; R_T – комплексное тепловое сопротивление «жила-окружающая среда», °С/Вт; $T_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, °С.

Численное решение предлагается вести с использованием метода Эйлера при условии, что предполагаемый шаг Δt значительно меньше тепловой постоянной времени τ , а режим признается недопустимым при условии $T(t) > T_{\text{доп}}$:

$$T_i = T_{i-1} + \frac{\Delta t}{\tau} \cdot \left[T_{\text{окр},i} + (T_{\text{длит.доп}} - T_{\text{окр,ном}}) \cdot \left(\frac{I_i}{I_{\text{ном}}} \right)^2 - T_{i-1} \right],$$

где $T_{\text{окр},i}$ и $T_{\text{окр,ном}}$ – температура окружающей среды фактическая и номинальная соответственно, °С; $T_{\text{длит.доп}}$ – длительно допустимая температура, °С; I_i – текущее значение тока, А; $I_{\text{ном}}$ – длительно допустимый ток, А.

Введение постоянной времени нагрева позволяет исключить ложные пики температуры при кратковременных коммутационных искажениях, выделенных в ходе вейвлет-анализа. Расчет возможно вести по методу сосредоточенных параметров, определяя τ как произведение полного теплового сопротивления и теплоемкости кабеля (с учетом ГОСТ Р МЭК 60287-2-1), так как данный подход соответствует моделям, описанным в ГОСТ Р МЭК 60853. Для проводов малых сечений (2,5–16 мм²) τ имеет порядок нескольких минут. Исходя из условия устойчивости явного метода Эйлера Δt принимается равным 0,1 τ , что гарантирует сходимость алгоритма.

Переход от теплового воздействия к ресурсному показателю (остаточный ресурс $D_{\text{ост}}$) осуществляется путем расчета скорости деградации диэлектрика. Относительная скорость старения основана на законе Аррениуса, и, с учетом правила Монтзингера, описывается как:

$$W(T) = 2^{\frac{T - T_{\text{длит.доп}}}{\Delta_{\text{exp}}}},$$

где $T_{\text{длит.доп}}$ – номинальная температура эксплуатации, °C; Δ_{exp} – константа удвоения скорости старения.

Поскольку старение изоляции является необратимым процессом, необходимо учитывать суммирование превышений температуры за каждый момент времени работы:

$$D_{\text{ост}} = \int_0^{t_{\text{общ}}} \frac{W(T(t))}{D_{\text{норм}}} dt,$$

где $D_{\text{норм}}$ – номинальный ресурс (срок службы при номинальной температуре).

В качестве параметров, на основании которых принимается решение о состоянии объекта, использованы два температурных критерия, распределенные на трех уровнях оценки:

- норма: $T \leq T_{\text{длит.доп}}$ – соответствует нормальному длительно допустимому режиму;
- предупреждение: $T_{\text{длит.доп}} < T \leq 0,9T_{\text{плав}}$ – фиксируется перегрев, ведущий к сокращению службы изоляции;
- аварийная ситуация: $T > 0,9T_{\text{плав}}$ или $D_{\text{ост}} \leq D_{\text{крит}}$ – критическое состояние, связанное с возникновением потенциального источника зажигания (непосредственно за счет нагрева, а также в результате потери изоляционных свойств и возникновения высокотемпературной дуги).

В рамках данной модели в качестве критического порога $D_{\text{крит}}$ предлагается $k \cdot D_{\text{норм}}$, где коэффициент k определяется регламентами эксплуатирующей организации.

Таким образом, разработанная методика представляет собой совокупность аналитических зависимостей и физических моделей, определяющих причинно-следственную связь между характером нагрузок и ресурсным состоянием изоляции.

Для практической реализации данной методики был синтезирован вычислительный алгоритм, позволяющий оценивать состояние нулевого провода. Верификация алгоритма проводилась на массивах данных, полученных с помощью имитационной модели, разработанной в среде MATLAB/Simulink. Модель представляла собой четырехпроводную трехфазную сеть напряжением 0,4 кВ, питающую группу потребителей общественного здания [12]. В качестве нагрузки использовались блоки, имитирующие вольт-амперные характеристики импульсных источников питания с регулируемым коэффициентом гармоник и возможностью задания несимметрии по фазам. Параметры кабельной линии соответствовали характеристикам АВВГ 4х16.

Ключевое значение имеет визуализация результатов расчета по предлагаемому алгоритму: совмещение на графиках кривых тока, допустимых уровней тока и температуры позволяет мгновенно идентифицировать интервалы перегрузки и перегрева, оценить их продолжительность и величину. Так, графическое представление моделируемой ситуации (рис. 5–6) убедительно демонстрирует необходимость реализации мер по снижению нагрузки нейтрали.

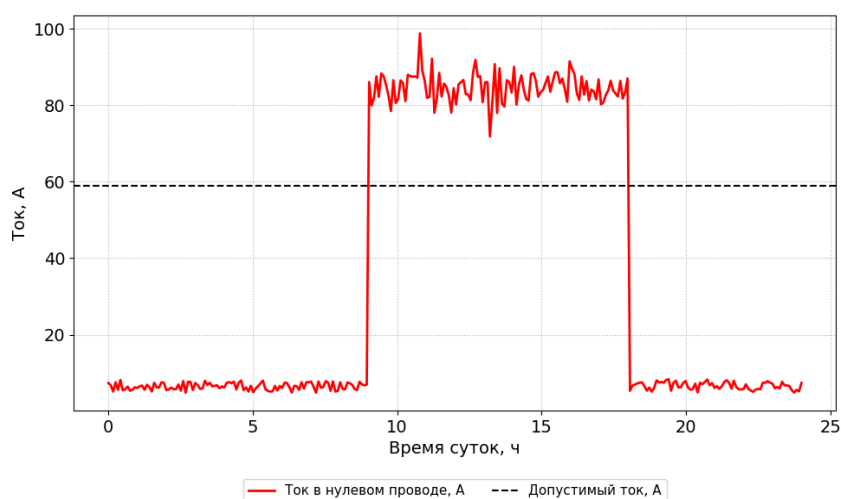


Рис. 5. График изменения тока в нулевом проводе

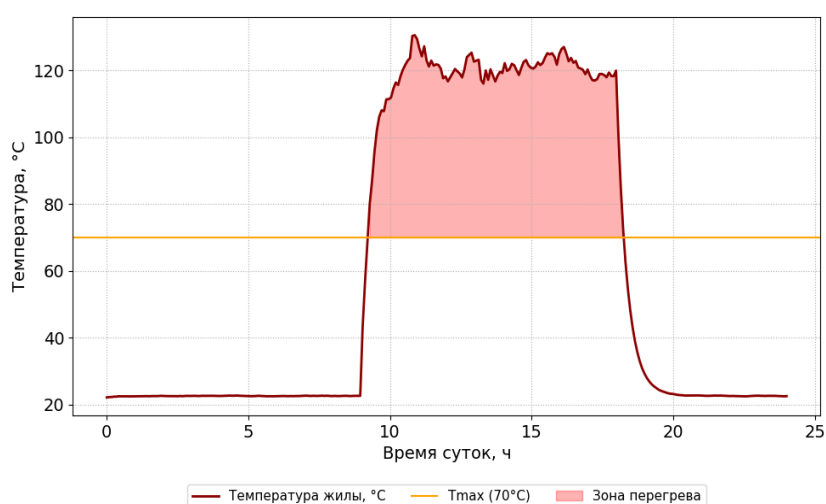


Рис. 6. График изменения температуры нагрева

Переходя к расчету изменения относительной скорости старения, возможно оценить снижение величины остаточного ресурса – для данного примера оно составило 1,2 % за сутки (рис. 7).

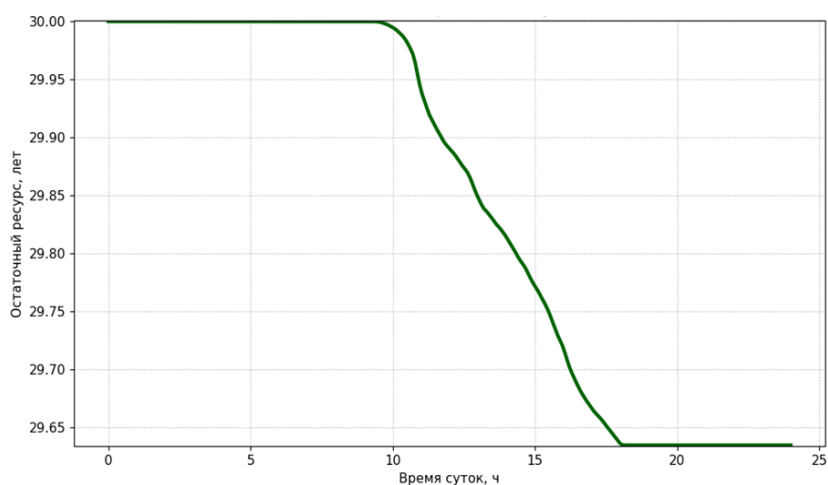


Рис. 7. График изменения остаточного ресурса

Заключение

В ходе исследования предложена и обоснована методика, использующая параметры фазных токов для косвенной оценки тепловых процессов в проводке, и применение которой обеспечивает контроль текущего состояния сети без необходимости прямого измерения температуры. Научная новизна полученных результатов заключается в систематизации расчетных зависимостей в единую методику, адаптированную для оценки пожарной опасности объектов защиты при возникновении перегрузки. Практические рекомендации по использованию разработанного алгоритма сводятся к его интеграции в существующие системы автоматизированного учета электроэнергии для выполнения анализа теплового состояния кабельных линий и проводки при отсутствии стационарных систем мониторинга. Дальнейшие исследования направлены на экспериментальную верификацию модели с использованием тепловизионного контроля, а также на разработку системы поддержки принятия решений в зависимости от полученных результатов оценки.

Список источников

1. Пожары и пожарная безопасность в 2024 г. Статистика пожаров и их последствия: информ.-аналитический сб. Балашиха: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2025. 80 с.
2. Huang X., Nakamura Yu. A Review of Fundamental Combustion Phenomena in Wire Fires. *Fire Technol.* 2020. № 56. P. 315–360.
3. A survey of Electrical Fire Causes Assessment Technology / H.D. Thai [et al.] // *IEEE Access.* 2024. Vol. 12. P. 1–17. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3437175
4. Effect of overload current values on the fire characteristics of polyethylene (PE) copper wires / J. Deng // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry.* 2023. Vol. 148. P. 11695–11705. DOI: 10.1007/s10973-023-12522-5
5. Shi B., Yang C., Long H. Research on the Fire Hazard of Different Cables Based on Cone Calorimetry // *Fire.* 2023. Vol. 6. Iss. 11. DOI: 10.3390/fire6110431
6. Оценка влияния горения кабельных линий в кабельных коробах на температуру ограждающих конструкций зданий и сооружений / М.В. Гравит [и др.] // *Безопасность труда в промышленности.* 2025. № 4. С. 36–42. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-4-36-42
7. Popławski T., Kurkowski M. Nonlinear Loads in Lighting Installations – Problems and Threats. *Energies.* 2024. № 16 (16). DOI: 10.3390/en16166024
8. Elsharkawy T.M.Z., Osman G.F.A., Salem W.A.A. The effect of nonlinear loads on the underground distribution cables: a case study // *Journal of Electrical Systems and Inf Technol.* 2022. Vol. 9. № 19. DOI: 10.1186/s43067-022-00061-2
9. Ghoneim S.S.M., Ahmed M., Sabiha N.A. Transient Thermal Performance of Power Cable Ascertained Using Finite Element Analysis. *Processes.* 2021. № 9. P. 438. DOI: 10.3390/pr9030438
10. Transient thermal circuit model optimization for power cables with axial heat dissipation / T. Qin [et al.] // *Front. Energy Res.* 2025. № 13. P. 1612773. DOI: 10.3389/fenrg.2025.1612773
11. Concepts and Methods to Assess the Dynamic Thermal Rating of Underground Power Cables / D. Enescu [et al.] // *Energies.* 2021. № 14. P. 2591. DOI: 10.3390/en14092591
12. Козлова Ю.С., Зыков В.И., Крупин М.В. Факторы несимметрии и несинусоидальности в электрических сетях при обеспечении пожарной безопасности электроустановок // *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация.* 2025. № 4. С. 118–124. DOI: 10.25257/FE.2025.4.118-124
13. Юндин М.А., Кобзистый О.В., Рудь Е.В. Оценка влияния уровней несимметрии и высших гармоник на ток в нулевом рабочем проводнике сети 0,38 кВ // *Вестник аграрной науки Дона.* 2021. № 3 (55). С. 33–38.

References

1. Pozhary i pozharnaya bezopasnost' v 2024 g. Statistika pozharov i ih posledstviya: inform.-analiticheskij sb. Balashiha: FGBU VNIPO MCHS Rossii, 2025. 80 s.
2. Huang X., Nakamura Yu. A Review of Fundamental Combustion Phenomena in Wire Fires. *Fire Technol.* 2020. № 56. P. 315–360.
3. A survey of Electrical Fire Causes Assessment Technology / H.D. Thai [et al.] // *IEEE Access.* 2024. Vol. 12. P. 1–17. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3437175
4. Effect of overload current values on the fire characteristics of polyethylene (PE) copper wires / J. Deng // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry.* 2023. Vol. 148. P. 11695–11705. DOI: 10.1007/s10973-023-12522-5
5. Shi B., Yang C., Long H. Research on the Fire Hazard of Different Cables Based on Cone Calorimetry // *Fire.* 2023. Vol. 6. Iss. 11. DOI: 10.3390/fire6110431
6. Ocenka vliyaniya goreniya kabel'nyh linij v kabel'nyh korobah na temperaturu ograzhdayushchih konstrukcij zdaniy i sooruzhenij / M.V. Gravit [i dr.] // *Bezopasnost' truda v promyshlennosti.* 2025. № 4. S. 36–42. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-4-36-42
7. Popławski T., Kurkowski M. Nonlinear Loads in Lighting Installations – Problems and Threats. *Energies.* 2024. № 16 (16). DOI: 10.3390/en16166024
8. Elsharkawy T.M.Z., Osman G.F.A., Salem W.A.A. The effect of nonlinear loads on the underground distribution cables: a case study // *Journal of Electrical Systems and Inf Technol.* 2022. Vol. 9. № 19. DOI: 10.1186/s43067-022-00061-2
9. Ghoneim S.S.M., Ahmed M., Sabiha N.A. Transient Thermal Performance of Power Cable Ascertained Using Finite Element Analysis. *Processes.* 2021. № 9. P. 438. DOI: 10.3390/pr9030438
10. Transient thermal circuit model optimization for power cables with axial heat dissipation / T. Qin [et al.] // *Front. Energy Res.* 2025. № 13. P. 1612773. DOI: 10.3389/fenrg.2025.1612773
11. Concepts and Methods to Assess the Dynamic Thermal Rating of Underground Power Cables / D. Enescu [et al.] // *Energies.* 2021. № 14. P. 2591. DOI: 10.3390/en14092591
12. Kozlova Yu.S., Zykov V.I., Krupin M.V. Faktory nesimmetrii i nesinusoidal'nosti v elektricheskikh setyah pri obespechenii pozharnoj bezopasnosti elektroustanovok // *Pozhary i chrezvychajnye situacii: predotvrashchenie, likvidaciya.* 2025. № 4. S. 118–124. DOI: 10.25257/FE.2025.4.118-124
13. Yundin M.A., Kobzistyj O.V., Rud' E.V. Ocenka vliyaniya urovnej nesimmetrii i vysshih garmonik na tok v nulevom rabochem provodnike seti 0,38 kV // *Vestnik agrarnoj nauki Dona.* 2021. № 3 (55). S. 33–38.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 02.03.2026; одобрена после рецензирования: 27.04.2026; принята к публикации: 25.05.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 02.03.2026; approved after review: 27.04.2026; accepted for publication: 25.05.2026

Информация об авторах:

Козлова Юлия Сергеевна, доцент Политехнической школы Югорского государственного университета (628011, Тюменская обл., ХМАО-Югра, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, д. 16), кандидат технических наук, e-mail: y_kozlova@ugrasu.ru, <https://orcid.org/0009-0006-6502-5921>, SPIN-код: 8371-6090

Information about the authors:

Kozlova Yulia S., associate professor at the polytechnic school of Yugra state university (628011, Tyumen Region, Khanty-Mansiysk, Chekhova str., 16), candidate of technical sciences, e-mail: y_kozlova@ugrasu.ru, <https://orcid.org/0009-0006-6502-5921>, SPIN: 8371-6090