

УДК 620.9

И.А. Бершадский /д.т.н. /, А.Ю. Гладков /к.т.н./, Н.А. Савинов, А.Д. Мых.
 ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЩИТЫ ОТ ПОЖАРООПАСНОГО ПЕРЕГРЕВА КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ УДЛИНИТЕЛЕЙ

Увеличение сопротивления электрического контактного соединения вызывает точечный нагрев или серию электрических дуг, которые зачастую приводят к последующим возгораниям строительных конструкций. Тем не менее, данный нагрев не обнаруживается обычными защитными устройствами, реализованными в удлинителях, в связи с чем удлинительные шнуры остаются распространенной причиной возгораний. Установлено, что при увеличении нормируемого сопротивления контакта в 11 раз, его температура нагрева увеличивается в 3,8 раза и составляет 319 °С. Получена зависимость температуры нагревания проводника в контактном соединении от его сопротивления, тока нагрузки, конструктивных факторов. Найденные зависимости позволяют определить параметры допустимого нагревания (времени и температуры) на параметры дополнительной защиты контактного соединения удлинителя.

Ключевые слова: электрический контакт, нагрев, контактная пластина удлинителя.

Постановка проблемы

Согласно статистических данных, имеющих в отделе пожарной статистики ВНИИПО (Всероссийского научно-исследовательского института противопожарной обороны, г. Москва) МЧС России, в период с 2016 по 2020 годы в РФ, несмотря на общее снижение количества пожаров, наблюдается увеличение количества пожаров, связанных с нарушением правил устройства и эксплуатации электрооборудования [1].

На диаграмме представлен сравнительный анализ количества пожаров, произошедших по причинам, связанным с эксплуатацией электроприборов в период с 2016 по 2020 годы (рис. 1).

Существенной проблемой обеспечения пожарной безопасности в низковольтных электроустановках жилых и общественных зданий являются отказы, связанные с раскаленными соединениями и искрениями, которые обычно возникают из-за перегрева некачественных электрических соединений, характеризующихся высоким электрическим сопротивлением [2].

Анализ последних исследований и публикаций

Международный фонд электробезопасности (ESFI) показывает, что удлинительные шнуры являются распространенной причиной возгораний [3]. Известен способ защиты удлинителя 220 В от токов перегрузки с помощью термобиметалла и от КЗ плавким предохранителем. Однако такой способ не обеспечивает защиту от возгораний, вызванных перегревом плохого электрического контакта по причине искрения или монотонного изменения его переходного сопротивления R_n при токах, меньших рабочего допустимого $I_{раб.д}$ В

патенте США [4] рассмотрен способ обнаружения перегретого контакта на основе контроля уровня и динамики изменения напряжения в конце цепи при коммутации дополнительной постоянной резистивной нагрузки. Однако он не подходит для контроля места повреждения в параллельной розеточной цепи из-за того, что измерительный ток не проходит через место повреждения. Кроме того, пороги по уровню динамики напряжения контроллера учитывают параметры стационарной кабельной линии – ее сечение и длину. При изменении длины кабеля и/или его сечения в удлинителе указанные пороги должны быть изменены.

Электрические пожары могут вызываться контактным нагревом, для которого механизм накопления тепла в настоящее время недостаточно изучен. Это исследование сосредоточено на электрических вилках и удлинителях, изготовленных из электротехнической латуни, являющихся основными компонентами, в которых часто возникают неконтролируемые электрические возгорания из-за механического износа и поломки [5]. В статье [6] рассмотрены подходы к определению температуры нагрева контактного соединения при допущении о его форме в виде горизонтального проводника (цилиндра) длиной l , м, и диаметром d , м. Получение аналитических зависимостей основано на формулах для безразмерных коэффициентов теплоотдачи.

Общими недостатками такого подхода можно назвать:

– для расчета α_c необходимо заранее знать температуру установившегося перегрева проводника в контактном соединении T_{ycm} ;

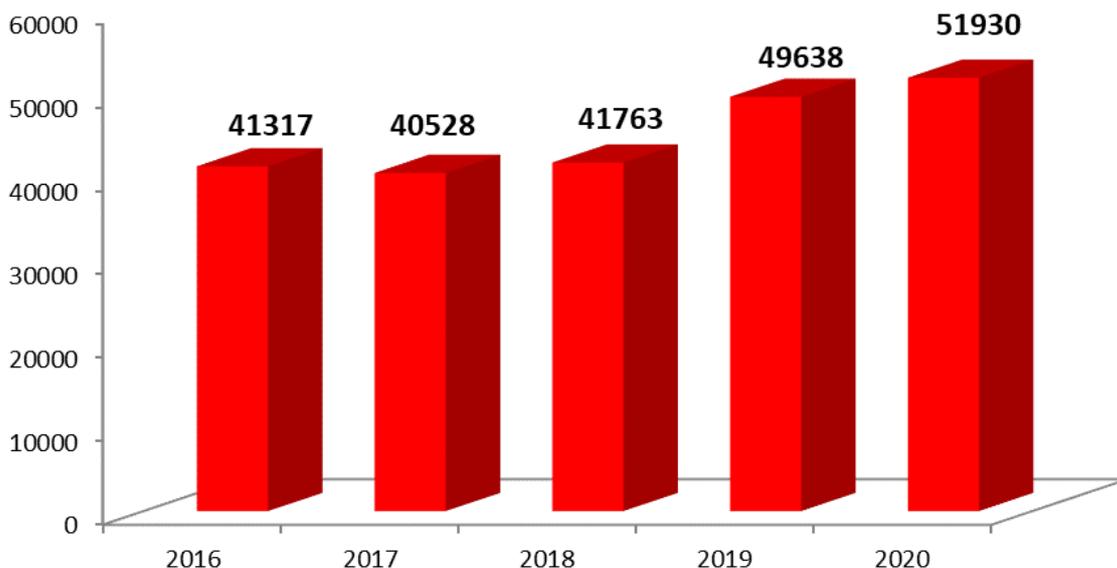


Рис. 1. Количество пожаров по причинам, связанным с электрооборудованием

– отличие формы контактных пластин от цилиндра.

Цель (задачи) исследования

Цель исследования – повышение эффективности защиты от перегрева клеммных соединений за счет обоснования параметров дополнительной защиты удлинителя (сетового фильтра). Для ее достижения предложена математическая модель нагрева проводников в контактном соединении удлинителя, учитывающая его переходное сопротивление, силу тока нагрузки, размеры теплопроводящих элементов и коэффициент теплоотдачи с поверхности проводника. Экспериментальным путем определена зависимость коэффициента теплоотдачи с поверхности проводника удлинителя от рассеиваемой мощности на нем.

Основной материал исследования

В существующих удлинителях и сетевых фильтрах есть термобиметаллическая защита от перегрузок, плавкий предохранитель от КЗ и защита от перегрева внутри корпуса в виде термопредохранителя. Последняя сработает, когда внутри уже будет недопустимый перегрев, т.е. не обеспечивает диагностики.

Предлагается добавить в удлинители новую защиту от перегрева плохого электрического контакта по причине искрения или монотонного изменения его переходного сопротивления. Принципом обнаружения «горячих» точек является установка термодатчиков для замера температуры нагрева медных пластин разборного соединения удлинителя. Её допустимо встраивать в

готовые удлинители, сохранив существующие виды защит. Пример такого подхода для штатного сетевого фильтра показан на рис. 2. Технологически это возможно, т.к. имеются свободные технологические полости в корпусе.

С целью определения уставок температуры срабатывания датчиков термореле необходимо провести математическое моделирование и получить обоснованное решение по определению зависимости изменения температуры нагрева проводника в месте контактного соединения от времени.

Рассмотрим данную задачу на примере 5-ти розеточного удлинителя с номинальным током 10 А, мощностью 2,2 кВт. Основные размеры контактных пластин удлинителя в мм (рис. 3) использованы при вычислении коэффициента теплоотдачи.

В ходе моделирования производится определение параметров допустимого нагрева контактного соединения в зависимости от его сопротивления, тока нагрузки и размеров теплопроводящих элементов удлинителя.

При прохождении тока в проводнике часть выделенной теплоты расходуется на повышение его температуры в контактном соединении и электроизоляции, а другая часть рассеивается в атмосферу, повышая температуру изоляции электропроводки и корпусных деталей.

Стационарный режим нагрева, при котором температура проводника в месте контактного соединения достигает постоянного значения, обусловлен значением тока, переходного сопротивления и условиями теплоотдачи.

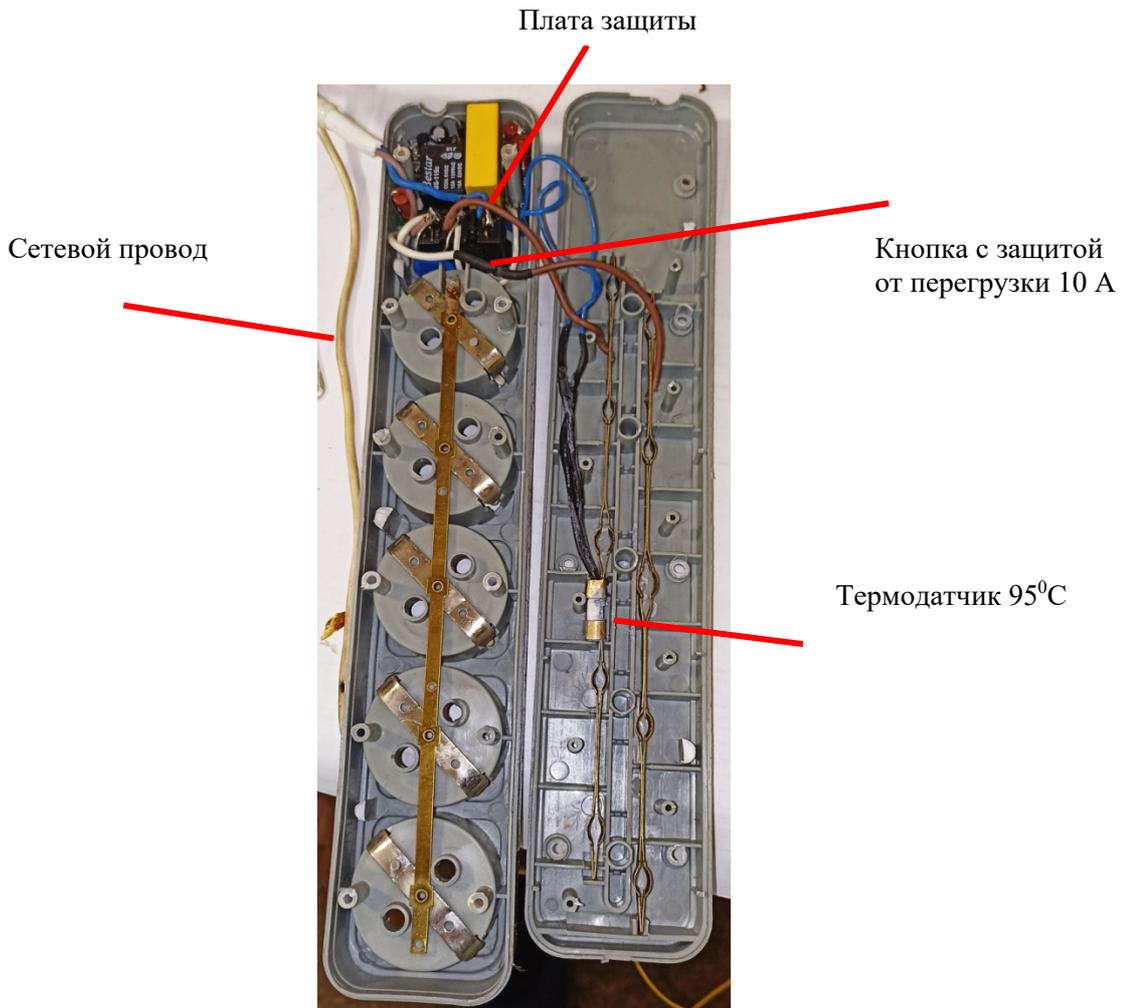


Рис. 2. Удлинитель с дополнительной защитой. Внешний вид

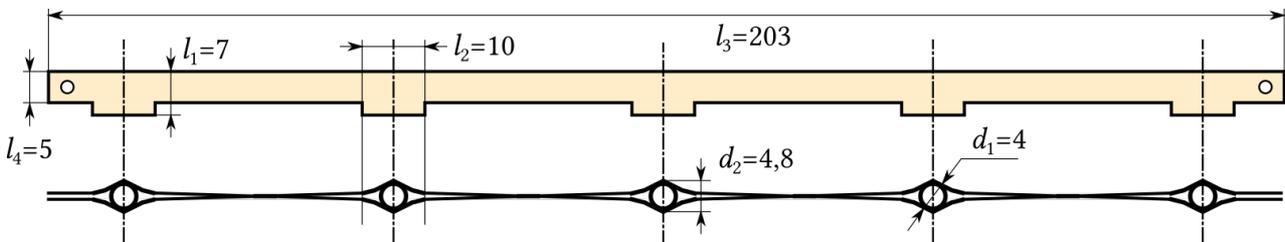


Рис. 3. Сборочный чертеж контактной пластины удлинителя

За время τ , с, в проводнике выделяется теплота:

$$Q = I^2 R_{\text{конт}} \tau, \quad (1)$$

где Q – количество выделяемой теплоты в проводнике, Дж;

I – длительно допустимый ток, А;

$R_{\text{конт}}$ – переходное сопротивление контактного соединения, Ом.

Баланс выделяемой теплоты Q распределяется на нагревание проводника и отдачу теплоты в окружающую среду с поверхности контактного соединения:

$$Q = Q_{\text{нагр}} + Q_{\text{рас}}, \quad (2)$$

где $Q_{\text{нагр}}$ – количество теплоты, затраченной на нагревание проводника в месте контактного соединения, Дж.

$$Q_{\text{нагр}} = cmdT \quad (3)$$

c – теплоемкость материала проводника, Дж/(кг·К);

m – масса проводника, кг;

$Q_{\text{рас}}$ – количество теплоты, затрачиваемой в контактном соединении на излучение с

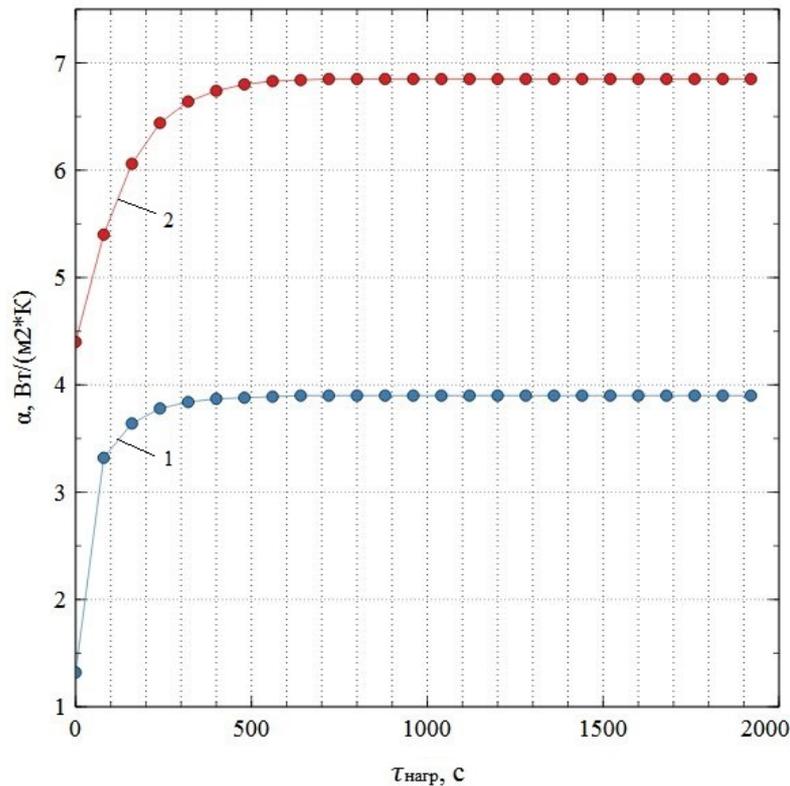


Рис. 4. Зависимость конвективной (1) и радиационной (2) теплоотдачи в проводнике от времени при силе тока 3А

поверхности проводника, конвекцию и теплопроводность, Дж.

$$Q_{рас} = \alpha S T_s d\tau \quad (4)$$

α – коэффициент теплоотдачи с поверхности проводника, Вт/ (м²·К);

S – площадь теплоотдающей поверхности проводника, м²;

T_s – температура поверхности проводника, К.

В формуле (4) наиболее сложно определяется коэффициент теплоотдачи α с поверхности проводника. Следует отметить, что α зависит от большого количества различных факторов: формы и размеров тела, давления и скорости движения окружающей среды, физических свойств среды и др., но самое главное, как показали дальнейшие эксперименты, с увеличением тока нагрузки удлинителя растет также и α , причем этот рост имеет нелинейный характер в зависимости от количества выделяемой мощности P .

В определенных условиях доля лучистого теплообмена может составлять до 30 % [6].

По закону Ньютона количество теплоты, отдаваемой единицей поверхности тела в единицу времени, пропорционально разности температур поверхности проводника T_s и окружающей среды T_c :

$$q_c = \alpha_c (T_s - T_c), \text{ Вт/м}^2, \quad (5)$$

где α_c – конвективный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

T_c – температура окружающей среды, К.

С учетом уравнений (1), (3), (4) выражение (2) примет вид:

$$I^2 R_{конт} d\tau = c m dT_s + \alpha S T_s d\tau \quad (6)$$

Переходя к диффуравнению с разделяющимися переменными:

$$[I^2 R_{конт} - \alpha S T_s] d\tau = c m dT_s \quad (7)$$

После интегрирования (7):

$$\int_0^{\tau_{нагр}} d\tau = \int_{T_0}^{T_{нагр}} \frac{c m dT_s}{I^2 R_{конт} - \alpha S T_s} \quad (8)$$

Установившая температура нагрева проводника в контактом узле $T_{уст}$ получена из (6) с учетом того, что в этом режиме $c m dT_s = 0$:

$$T_{уст} = \frac{I^2 R_{конт}}{\alpha S} \quad (9)$$

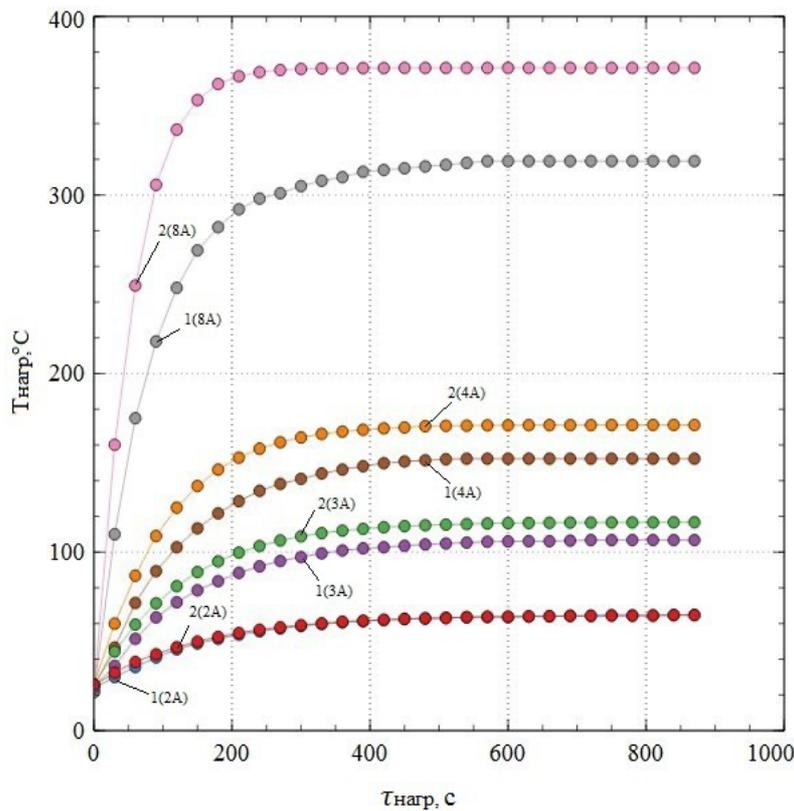


Рис. 5. Зависимость температуры нагрева проводника в месте контактного соединения от времени (1 – эксперимент, 2 – теория)

Интегрируя (8), находим зависимость температуры нагревания проводника в месте контактного соединения $T_{нагр}$ от времени:

$$T_{нагр}(\tau_{нагр}, R_{конт}, I) = \frac{I^2 R_{конт}}{\alpha S} - \left(\frac{I^2 R_{конт}}{\alpha S} - T_0 \right) e^{-\frac{\tau_{нагр} \alpha S}{ct}}, \quad (10)$$

где $\tau_{нагр}$ – время нагрева, с;
 α – коэффициент теплоотдачи с поверхности проводника, Вт/(м²·К);
 С учетом (9):

$$T_{нагр} = T_{уст} - (T_{уст} - T_0) e^{-\frac{\tau_{нагр} \alpha S}{ct}}, \quad (11)$$

где T_0 – начальная температура нагрева проводника в месте контактного соединения, К;

$\tau_{нагр}$ – время нагрева, с.

Передача тепла в корпусе удлинителя соответствует задаче по определению теплоотдачи в ограниченном пространстве в условиях свободной конвекции, например, для каналов, щелей, различного рода прослоек. Особенностью теплоотдачи в этом случае является то, что нагревание и охлаждение воздушной прослойки происходит вблизи границ (стенок). Такой процесс рассматривается как единое целое способов теплопередачи – конвекции и теплопроводности.

Порядок решения задачи:

- задаются размеры корпуса и контактных пластин, а также их материал;
- определяются теплофизические свойства материала контактных пластин и воздушной прослойки в виде таблиц;
- при заданной температуре воздуха определяются его теплофизические свойства;
- определяются критерии Грасгофа Gr и Прандтля Pr ;
- определяется эквивалентный коэффициент теплопроводности плоской воздушной прослойки ϵ_k ;
- определяется коэффициент конвективной теплоотдачи $\alpha_{конв}$;
- определяется коэффициент радиационной теплоотдачи $\alpha_{рад}$;
- определяется суммарный коэффициент теплоотдачи $\alpha = \alpha_{конв} + \alpha_{рад}$.

Перечень исходных данных об удлинителе, необходимых для расчета:

- материал пластин удлинителя – латунь;
- масса проводника (пластина + штифты) – 0,0102 кг;
- размеры пластины удлинителя $d_1, d_2, l_1, l_2, l_3, l_4$ (см. рис. 3);
- $\delta = 0,016$ м – ширина канала (полость внутри удлинителя, см. рис. 2);
- $\epsilon = 0,73$ – степень черноты поверхности;

- $R_k=0,33$ Ом – сопротивление контакта;
- $I=2$ А – сила тока, проходящего через контакт;
- $P=I^2 \cdot R_k$, Вт – мощность тепловыделения в контакте;
- $\alpha_p = 0,1 \cdot 10^{-3} K^{-1}$ – температурный коэффициент сопротивления латуни.

Определяется площадь поверхности контакта (рис. 3) по формуле:

$$S = 2 \cdot I_3 \cdot I_4 + \pi \cdot d_1 \cdot I_1 + \pi \cdot d_1 \cdot (I_2 - I_1) = 2 \cdot 0,203 \cdot 0,005 + 3,14 \cdot 10^{-3} \cdot 7 \cdot 10^{-3} + 3,14 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot (18 \cdot 10^{-3} - 7 \cdot 10^{-3}) = 2,388 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Число Грасгофа определяется по формуле:

$$Gr = \frac{9,80666 \cdot \frac{1}{\left(\frac{t_n+t_B}{2}+273,15\right)} \cdot |t_n-t_B| \cdot \delta^3}{\left(\nu_t \left(\frac{t_n+t_B}{2}\right)\right)^2},$$

- где t_n – температура поверхности, °С;
- t_B – температура воздуха, °С;
- ν_t – кинематическая вязкость воздуха, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$;

Определяем число Прандтля:

$$Pr = \frac{\mu_t \cdot \left(\frac{t_n+t_B}{2}\right) \cdot Cp_t \cdot \left(\frac{t_n+t_B}{2}\right)}{\lambda_t \cdot \left(\frac{t_n+t_B}{2}\right)},$$

где μ_t – динамический коэффициент вязкости воздуха, Па · с;

Cp_t – удельная изобарная теплоемкость воздуха, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$;

λ_t – коэффициент теплопроводности воздуха, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$;

Определяется эквивалентный коэффициент теплопроводности плоской воздушной прослойки:

$$\varepsilon_k = 0,18 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25}; \quad (12)$$

Далее определяется коэффициент конвективной теплоотдачи:

$$\alpha_{конв} = \frac{\varepsilon_k \cdot \lambda_t \cdot \left(\frac{t_n+t_B}{2}\right)}{\delta}; \quad (13)$$

Коэффициент радиационной теплоотдачи рассчитывается по формуле:

$$\alpha_{рад} = \frac{\varepsilon \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot ((t_n+273,15)^4 - (t_B+273,15)^4)}{t_n - t_B}; \quad (14)$$

Выделяемая теплота в проводнике:

$$Q = I^2 \cdot R_k \cdot (1 + \alpha_p \cdot (t_n - 20)) \quad (15)$$

Рассмотрим особенности расчета на примере токовой нагрузки $I_{нагр}=3$ А. Сопротивление контактного соединения принимаем $R_{конт}=0,33$ Ом, мощность, выделяемая в контактном соединении $P=I^2 \cdot R_{конт}=2,97$ Вт, а $T_0=25,3$ °С.

Коэффициенты теплоотдачи $\alpha_{рад}$, $\alpha_{конв}$ изменяются в процессе нагрева (рис. 4).

Температура контактного соединения удлинителя от времени при силе тока от 3А до 8А рассчитывалась по (11) и проверялась экспериментально в отделе электрооборудования МАКНИИ (рис. 5). Максимальная погрешность при токе 8 А составила 16,3%. Т.о., приведенный метод позволяет рассчитывать $T_{уст}$ при любых сочетаниях $I_{нагр}$ и $R_{конт}$ для указанного типа удлинителей.

Согласно ГОСТ 31223-2012 [7] в нормальном режиме в удлинителях, имеющих соединения между неподвижными и подвижными частями, должно выполняться $R_{конт} \leq 0,05$ Ом. В проведенных нами экспериментах $R_{конт}$ не превышало 0,02 Ом, тогда при $I_{нагр}=10$ А из (11) получили $T_{уст}=86,5$ °С. Выбрано термореле ThermalFuseSeries с температурой действия 95 ± 5 °С и температурой возврата 70 ± 10 °С.

Выводы

1. Значительное количество возгораний связано с аварийными режимами работы электрических сетей. Места соединения проводов, в частности, в клемных соединениях внутри корпусов электроизделий, остаются недостижимыми для проверки и могут стать источником пожара вследствие возникновения больших переходных сопротивлений.

2. Впервые предложены удобные для инженерных расчетов формулы для определения температуры нагрева контактных пластин удлинителя в зависимости от количества выделяемой мощности на примере типового 5 розеточного удлинителя с номинальным током 10 А.

3. Путем разработанного расчетного метода определена температура срабатывания датчиков термореле защиты удлинителя от перегрева его контактных соединений (95 ± 5 °С) при различных сочетаниях $I_{нагр}$ и $R_{конт}$ для указанного в п. 1 типа удлинителя.

Список литературы

1. Статистика пожаров в Российской Федерации [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://mchsgov.ru/>. – Загл. с экрана.

2. Бершадский, И. А. Обоснование способа защиты электрической сети напряжением 220 В от перегрузок с учетом нестационарного нагрева электропроводки [Электронный ресурс] / И. А. Бершадский, А. В. Згарбул, А. А. Кулиш // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2019. – 2(16). – С. 71-79.
3. Consumer fire safety: European statistics and potential fire safety measures [Text] // Final report, Netherlands Institute for Safety. – Nibra, January 2009.
4. J.J. Shea, US Patent No. 8,854,066 (3 Oct, 2014). Method and apparatus for detecting a glowing contact in a power circuit [Электронный ресурс] – Режим доступа <https://patents.google.com/patent/WO2013151626A1/en>. – Загл. с экрана.
5. Solyonyj, S. Automatic System of Monitoring and Diagnostics of Sparking in Contact [Text] / S. Solyonyj, O. Solenaya and Andrey Roznhin // MATEC Web of Conferences 77, 12003. – 2016. – P. 1-5.
6. Зинченко, Е.О. Температура нагревания проводников в контактных соединениях электроустановок [Текст] / Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2017. – №3(54). – С. 36-47.
7. Удлинитель бытового и аналогичного назначения на кабельных катушках. Общие требования и методы испытаний: ГОСТ 31223-2012 (IEC 61242:1995). Введ. 01.01.2014. Москва: Росстандарт, 2014. 52 с

I.A. Bershadsky /D. Sc./, A.Yu. Gladkov /Cand. Sci. (Eng.)/, N.A. Savinov, A.D. Mykh
Donetsk National Technical University (Donetsk)

INVESTIGATION OF PROTECTION AGAINST FIRE-HAZARDOUS OVERHEATING OF TERMINAL CONNECTIONS OF EXTENSION CORDS

Background. An increase in the resistance of an electrical contact connection causes spot heating or a series of electric arcs, which often lead to fires. However, this heating is not detected by conventional protective devices implemented in extension cords, and therefore extension cords remain a common cause of fires.

Materials and/or methods. It is established that with an increase in the normalized contact resistance by 11 times, its heating temperature increases by 3.8 times and is 319°C. The schematic solution for protecting the extension cord from overheating of the contact connection above 90°C is given, which helps to prevent fires at rated currents. The constructive implementation of the protection provides the required compactness and allows it to be located in the technological cavity of the extension housing.

Results. The parameters of the permissible heating of the contact connection were determined depending on its resistance, load current and the size of the heat-conducting elements of the extension.

Conclusion. By means of the developed computational and experimental method, the temperature of operation of the sensors of the thermal relay for protecting the extension cable from overheating of its contact connections, as well as heat transfer, heating temperature and the amount of heat generated by the contact plate of the extension is determined.

Keywords: terminal connection, voltage, temperature, current, relay, wiring, electric extension cable.

Сведения об авторах

И.А. Бершадский

SPIN-код: 4772-3504
ORCID iD: 0000-0001-7383-3415
Телефон: +38 (071)414-28-12
Эл. почта: ibersh164@gmail.com

А.Ю. Гладков

SPIN-код: 5966-7682
Телефон: +7 (949)420-16-97
Эл. почта: gladkov5555@rambler.ru

Н.А. Савинов

SPIN-код: 6103-3193
Телефон: +7 (949)395-60-58
Эл. почта: excreman97@gmail.com

А.Д. Мых

Телефон: +7 (949)341-01-68
Эл. почта: vip.myh@mail.ru

Статья поступила 04.03.2022 г.

©И.А. Бершадский, А.Ю. Гладков, Н.А. Савинов, А.Д. Мых, 2022
Рецензент д.т.н., проф. К.Н. Маренич