

УДК 621.3.066

ББК 31.292

И.А. БЕРШАДСКИЙ, А.Д. МЫХ

СПОСОБ КОНТРОЛЯ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ РАЗЪЕМНОГО КОНТАКТНОГО СОЕДИНЕНИЯ СЕТЕВОГО ФИЛЬТРА

Ключевые слова: электрический контакт, нагрев, контактная пластина сетевого фильтра.

Увеличение сопротивления электрического контактного соединения в электросети жилой квартиры вызывает точечный нагрев или серию электрических дуг, которые часто приводят к пожарам, тем не менее данный нагрев не обнаруживается обычными защитными устройствами, реализованными в сетевых фильтрах, в связи с чем остается угроза возгораний.

Цель исследования – повышение эффективности защит контактов штепсельного соединения сетевого фильтра от избыточного перегрева за счет обоснования параметров защитного устройства с термоэлектрическим эффектом. Научная новизна состоит в определении структурной его схемы, а также получении количественных характеристик работы.

Материалы и методы. Объектом исследования являются электрические сетевые фильтры. Предмет исследования – схематическое решение защиты сетевого фильтра от перегрева контактного соединения, способствующее предотвращению возгораний при номинальных токах. Использован метод математического моделирования нагрева проводников в контактном соединении сетевого фильтра, основанный на решении уравнения теплового баланса, а также методы анализа и обобщения. Для замера температуры нагрева пластин разборного соединения сетевого фильтра установлена группа термодатчиков, место размещения которых и установка температуры срабатывания защиты определяются путем экспериментов.

Результаты. Для сетевого фильтра с номинальным током 10 А предложена математическая модель нагрева проводников в контактном соединении, подверженном ослаблению или деградации, учитывающая его переходное сопротивление, силу тока нагрузки, размеры конструктивных теплоотводящих элементов. Экспериментальным путем определена зависимость температуры поверхности контактного соединения от его переходного сопротивления в режимах аварийной и нормальной работы. При этом установлены временная характеристика нагрева контактной пластины 5-розеточного сетевого фильтра, а также распределение ее нагрева по продольной координате. Показано, что электрическая схема защиты сетевого фильтра от большого переходного сопротивления контактной системы включает термореле, устанавливаемое посередине посадочных мест под штепсельные розетки (по две на каждой контактной пластине), а также триггерную схему для фиксации повреждения и систему индикации.

Выводы. Возникающее вследствие механического ослабления плотности прилегания поверхностей токоведущих элементов увеличение сопротивления контактного соединения в 6-8 раз по отношению к нормируемому приводит к перегреву соединения до 160–250°C с дальнейшим появлением короткого замыкания в сети и пожаров. Приведенное схематехническое решение защиты сетевого фильтра от режима перегрева дефектного контактного соединения размыкает сеть до того момента, когда может произойти оплавление или возгорание неметаллических составляющих штепсельного соединения. Установившийся температурный перегрев контактного соединения типовых 3- и 5-розеточных сетевых фильтров с номинальным током 10 А в нормальном режиме не превышает 11°C, поэтому дополнительная защита построена на основе термоэлектрического метода контроля (по превышению или разности температур). Необходимая температура срабатывания датчиков термореле данной защиты – (45±5°C) при различных сочетаниях нагрузочного тока и сопротивления контактного соединения, что позволяет произвести отстройку от нежелательных пусков в режимах нормальной нагрузки.

Введение. В 2023 г., согласно данным Всероссийского научно-исследовательского института противопожарной обороны, г. Москва (ВНИИПО) МЧС России, в Российской Федерации произошло 60 877 пожаров вследствие нарушения правил устройств и эксплуатации электрооборудования и бытовых приборов [5]. Погиб 2 251 человек, 2 664 было травмировано, а материальные убытки составили более 9 млрд руб. Это значительный ущерб.

Существенной проблемой обеспечения пожарной безопасности в низковольтных электроустановках жилых и общественных зданий является отсутствие контроля больших переходных сопротивлений (БПС) в местах присоединения проводников к аппаратам, приборам, а также в местах соединения проводников. Норматив РД 34.45-51.300-97¹ ограничивает величину БПС до 50 мОм (30 мОм – во взрывоопасных помещениях и зонах). При их превышении происходят перегревы и искрения в местах БПС, а это ведет к воспламенению изоляции и корпусных деталей.

Обнаружение БПС происходит, как правило, уже на поздней стадии пожароопасного отказа электроустановки, так как наиболее распространенные аппараты защиты квартирной сети, действующие по токовому принципу, в этом случае не срабатывают – ток в цепи не растет, а снижается [6].

Рассмотрим основные уязвимые с точки зрения БПС элементы системы электроснабжения квартиры жилого дома: электромонтажные коробки, электрические розетки, сетевые фильтры (СФ), контактные колодки электросчетчиков и щитов. Во всех указанных элементах необходим контроль теплового состояния контактных узлов при увеличении БПС. При этом различают два режима электросети – искровой и безыскровой, но оба они характеризуются локальным повышением температуры. Также отметим, что безыскровой режим часто переходит в искровой из-за разрушения металла в зоне нарушенного ослабленного контакта.

Известные предлагаемые способы защиты штепсельного соединения розеточного типа [4, 10] не учитывают в полной мере конструктивные особенности электротехнического изделия, зависимы от параметров и типа сети и не позволяют выбирать характеристику и место установки термочувствительного элемента, при которых отсутствуют ложные срабатывания в номинальных режимах работы.

Цель исследования – повышение эффективности защит контактов штепсельного соединения СФ от избыточного перегрева за счет обоснования параметров защитного устройства с термоэлектрическим эффектом. Научная новизна состоит в определении его структурной схемы, а также получении количественных характеристик работы.

Материалы и методы. Объектом исследования являются электрические СФ, предметом исследования – схематическое решение защиты СФ от перегрева контактного соединения, способствующее предотвращению возгораний при номинальных токах. Для получения данных о температурном режиме

¹ Объем и нормы испытаний электрооборудования. РД 34.45-51.300-97. 6-е изд. (утв. РАО «ЕЭС России») 08.05.1997). М.: Изд-во НЦ ЭНАС. 2004 178 с.

контактного соединения (КС) в определенных условиях, создание которых может быть сложно осуществимо, использованы метод математического моделирования нагрева проводников в контактном соединении СФ, основанный на решении уравнения теплового баланса, а также методы анализа и обобщения. Компьютерные расчеты выполнены с использованием математических пакетов Mathcad 15 и Veusz. Для замера температуры нагрева пластин разборного соединения СФ установлена группа термодатчиков, место размещения которых и уставка температуры срабатывания защиты определяются путем экспериментов. Переходное контактное сопротивление измерялось микроомметром С.А. 6250.

Результаты исследования. С целью определения уставок температуры срабатывания датчиков термореле необходимо провести математическое моделирование и получить обоснованное решение по определению установившейся температуры нагрева проводника в месте КС СФ.

Кроме того, учитывая неравномерность нагрева по длине контактной пластины СФ, экспериментально проверим разность температур термодатчиков при установке их на разном удалении от источника нагрева.

Рассмотрим данную задачу на примере 3- и 5-розеточных СФ с номинальным током 10 А, мощностью 2,2 кВт. Основные размеры контактных пластин СФ и вилки (рис. 1 и 2) использованы при вычислении коэффициента теплоотдачи.

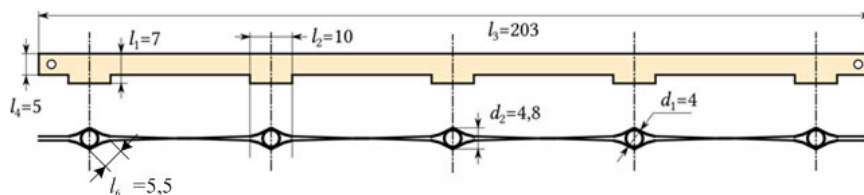


Рис. 1. Чертеж контактной пластины 5-розеточного СФ

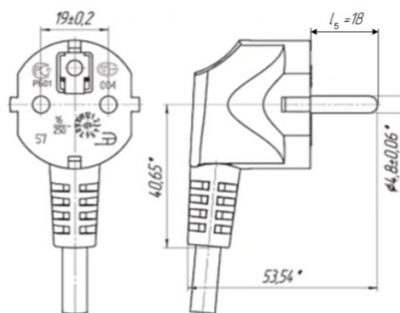


Рис. 2. Чертеж вилки бытового прибора

Выделенная теплота при прохождении тока через КС расходуется на прирост его температуры и температуры электроизоляции, а другая часть рассеивается в окружающую среду.

Уравнения, определяющие динамические режимы нагрева КС, приведены в [1–3]. При этом наибольшую сложность представляет определение α – коэффициента теплоотдачи с поверхности проводника, Вт/(м²·К) (зависит от большого количества различных факторов).

Доля лучистого теплообмена может достигать 30% [4].

В работах [1, 6] проведен математический расчет тепловых процессов нагрева КС, однако допускалось, что нагрев происходит достаточно быстро и при большой плотности тока. Поэтому общий коэффициент теплоотдачи принят постоянным и не зависящим от температуры и формы контактного цилиндрического соединения. Кроме того, необходимо учесть тот факт, что вследствие малых площадей теплоотвода с поверхностей контактных деталей (КД) сопротивление КС $R_{КС}$ складывается из переходного сопротивления в месте соприкосновения рабочих поверхностей КД $R_{пер}$ и сопротивления двух КД, соединяемых на длине $R_{КД}$: $R_{КС} = R_{пер} + R_{КД}$.

Согласно [7], температура КС (с учетом превышения температуры зоны контактирования над средней температурой КС) определяется по выражению

$$\theta_{КС} = \theta_0 + \max(\theta_{3.В}, \theta_{3.П}) + \theta_2 = \theta_0 + \frac{I_{ном}^2 \rho_i l}{k_{Т.С} S q} + \frac{I_{ном}^2 R_{КС} \sqrt{l}}{2 \sqrt{k'_{Т.С}} \lambda S_{КС} q}, \quad (1)$$

где $\theta_0 = 24,7^\circ\text{C}$ – температура окружающей среды; $\theta_{3.В}$ и $\theta_{3.П}$ – превышения температуры вилки и пластины соответственно над температурой окружающей среды, $^\circ\text{C}$; θ_2 – превышение температуры зоны контактирования над температурой КС, $^\circ\text{C}$; $I_{ном}$ – номинальный ток, А; ρ_i – удельное сопротивление КД, составляющих КС ($i = 1$ – пластины, $i = 2$ – вилки), Ом·м; l – длина КС, м; $k_{Т.С}$ – коэффициент теплообмена с поверхности соединяемой детали (соответственно, пластины $k_{ТСП}$ или вилки $k_{ТСВ}$), Вт/м²·К; S – площадь боковой поверхности соединяемых деталей (соответственно пластины $S_{КСП}$ или вилки $S_{КСВ}$), м²; q – поперечное сечение соединяемой детали (пластины или вилки), м²; $R_{КС}$ – сопротивление КС, Ом; $k'_{Т.С} = 0,5(k_{ТСП} + k_{ТСВ})$ – суммарный коэффициент теплообмена с поверхностей КС, Вт/м²·К; $\lambda = 2\lambda_1\lambda_2/(\lambda_1 + \lambda_2)$ – средняя теплопроводность соединяемых деталей (λ_1 и λ_2 – теплопроводности материалов пластины и вилки соответственно), Вт/м·К; $S_{КС}$ – площадь боковой поверхности КС, м².

Для проведения дальнейших расчетов введем следующие обозначения:

$\theta_1 = 30^\circ\text{C}$ – предварительная температура нагрева контактных пластин;

$\theta_{опр} = 0,5 \cdot (\theta_0 + \theta_1) = 27,35^\circ\text{C}$ – определяющая температура окружающей среды;

$\tau = \theta_1 - \theta_0 = 5,3^\circ\text{C}$ – превышение температуры КД над температурой окружающей среды.

Определим коэффициенты теплообмена с поверхности контактной пластины СФ и вилки по формуле

$$k_{Т.С} = k_{Т.К} + k_{Т.И}, \quad (2)$$

где $k_{Т.К}$ – коэффициент конвективного теплообмена с поверхности КД, который рассчитывается согласно [8. Табл. 3.5]; $k_{Т.И}$ – коэффициент теплового излучения с поверхности КД, рассчитываемый по формуле

$$k_{\text{т.и}} = \frac{5,67 \cdot 10^{-8} \varepsilon \left((273 + \theta_1)^4 - (273 + \theta_0)^4 \right)}{(\theta_1 - \theta_0)}, \text{ Вт/}(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad (3)$$

где ε – степень черноты излучения [8. Табл. 3.6]: $\varepsilon_1 = 0,73$ – для пластины; $\varepsilon_2 = 0,63$ – для вилки.

Коэффициенты излучения с поверхностей пластины ($k_{\text{т.и.п}}$) и вилки ($k_{\text{т.и.в}}$)

$$k_{\text{т.и.п}} = \frac{5,67 \cdot 10^{-8} \varepsilon_1 \left((273 + \theta_1)^4 - (273 + \theta_0)^4 \right)}{\theta_1 - \theta_0} = 4,486 \text{ Вт/}(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

$$k_{\text{т.и.в}} = \frac{5,67 \cdot 10^{-8} \varepsilon_2 \left((273 + \theta_1)^4 - (273 + \theta_0)^4 \right)}{\theta_1 - \theta_0} = 3,872 \text{ Вт/}(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Для расчета коэффициента теплообмена $k_{\text{т.к}}$ с поверхности КД конвекцией определим критерии Грасгофа и Прандтля.

Критерий Грасгофа [7]:

$$Gr = \frac{9,81 \beta \tau l^3}{\nu^2}, \quad (4)$$

где $\beta = 1/(\theta_{\text{опр}} + 273) = 3,328 \cdot 10^{-3}$ – коэффициент объемного расширения, $1/\text{К}$; l – длина КС, м; ν – кинематическая вязкость окружающей среды при температуре $\theta_{\text{опр}}$, $\text{м}^2/\text{с}$.

Для 5-розеточного СФ (см. рис. 1) $Gr = 44,6$. Критерий Прандтля при температуре $\theta_{\text{опр}} = 27,35^\circ\text{C}$, согласно [8. Табл. 3.8], равен $Pr = 0,701$. Тогда

$$Gr \cdot Pr = 44,6 \cdot 0,701 = 31,2.$$

Коэффициент теплообмена с поверхности шин посредством конвекции при значении $Gr \cdot Pr = 31,2$, согласно [8], рассчитывается по формуле

$$k_{\text{т.к}} = A_1 (\tau / d l^5)^{1/8} = 0,31 \left(5,3 / (4 \cdot 10^{-3})^5 \right)^{1/8} = 12,04 \text{ Вт/}(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad (5)$$

где A_1 – коэффициент, который, согласно [8], при $Gr \cdot Pr = 31,2$ и $\theta_{\text{опр}} = 27,35^\circ\text{C}$ равен 0,31.

Определим суммарный коэффициент теплообмена с каждой из КД – пластиной и вилкой:

$$k_{\text{т.с.п}} = k_{\text{т.к}} + k_{\text{т.и.п}} = 12,04 + 4,48 = 16,52 \text{ Вт/}(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

$$k_{\text{т.с.в}} = k_{\text{т.к}} + k_{\text{т.и.в}} = 12,04 + 3,87 = 15,91 \text{ Вт/}(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Суммарный коэффициент теплообмена с поверхности КС:

$$k'_{\text{т.с}} = 0,5 \cdot (k_{\text{т.с.п}} + k_{\text{т.с.в}}) = 0,5(16,52 + 15,91) = 16,21 \text{ Вт/}(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Определим площади боковых поверхностей каждой из соединяемых КД:

– пластины

$$S_{\text{КСП}} = \pi d_2 l_1 = 1,056 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

– вилки

$$S_{\text{КСВ}} = \pi d_1 l_5 = 2,262 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Площадь боковой поверхности КС определим по формуле

$$S_{\text{КС}} = \pi d_1 (l_5 - l_1) + \pi \left(\frac{d_2 + d_1}{2} \right) l_1 + 4l_6 l_1 = 3,903 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Теплопроводность материалов КД для латунной пластины равна $\lambda_l(\theta_1) = 107,25 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; для стальной вилки – $\lambda_{st}(\theta_1) = 60,5 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$. Тогда средняя теплопроводность КС

$$\lambda = \frac{2\lambda_l \lambda_{st}}{(\lambda_l + \lambda_{st})} = 77,3 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

Определим превышение температуры КД над температурой окружающей среды при $I_{\text{ном}} = 2 \text{ А}$. Для латунной пластины оно будет равно

$$\theta_{3,\text{П}} = \frac{I_{\text{ном}}^2 \rho_{\text{П}} l_1}{0,0005 k_{\text{ТСП}} S_{\text{КСП}} \pi d_2} = 0,152^\circ \text{С}, \quad (6)$$

а для стальной вилки:

$$\theta_{3,\text{В}} = \frac{I_{\text{ном}}^2 \rho_{\text{В}} l_5}{k_{\text{ТСВ}} S_{\text{КСВ}} \frac{\pi d_1^2}{4}} = 0,197^\circ \text{С}. \quad (7)$$

Принимаем $R_{\text{КС}} = 0,33 \text{ Ом}$, тогда превышение температуры зоны контактирования над температурой стальной вилки (максимально нагретая КД) составит

$$\theta_2 = \frac{1}{2} \frac{I_{\text{ном}}^2 R_{\text{КС}} \sqrt{d_1}}{\sqrt{k'_{\text{ТС}} \lambda S_{\text{КС}} \left(\frac{\pi d_1^2}{4} \right)}} = 16,82^\circ \text{С}. \quad (8)$$

Согласно (1) с учетом (2)–(8) температура КС равна

$$\theta_{\text{КС}} = \theta_0 + \theta_{3,\text{В}} + \theta_2 = 24,7 + 0,197 + 16,82 = 41,7^\circ \text{С}.$$

Аналогичные расчеты проводились при варьировании $I = 2,3..8 \text{ А}$ и $R_{\text{КС}} = 24..330 \text{ мОм}$ (табл. 1 и 2, рис. 3).

Таблица 1

Результаты расчета нагрева КС для 5-розеточного СФ
(материал пластин – латунь, материал вилки – сталь), $d_1 = 4 \text{ мм}$, $d_2 = 4,8 \text{ мм}$,
 $l_1 = 7 \text{ мм}$, $l_2 = 10 \text{ мм}$, $l_3 = 203 \text{ мм}$, $l_4 = 5 \text{ мм}$, $l_5 = 18 \text{ мм}$, $l_6 = 5,54 \text{ мм}$

Ток режима, А	Сопротивление КС, Ом	Расчет				Эксперимент $\theta_{\text{КС.эксп}}$, °С
		$\theta_{3,\text{П}}$, °С	$\theta_{3,\text{В}}$, °С	θ_2 , °С	$\theta_{\text{КС}}$, °С	
2	0,33	0,152	0,197	16,82	41,7	53
3	0,33	0,34	0,444	37,9	63	91
4,8	0,024	0,87	1,13	7,049	32,8	–
	0,11			32,3	58,1	–
	0,2			58,8	84,6	–
	0,33			97,09	122,9	132
8	0,024	2,42	3,15	19,6	47,4	–
	0,11			89,9	117,7	–
	0,2			163,4	191,3	–
	0,33			269,7	297,5	319

Таблица 2

Результаты расчета нагрева КС для 3-розеточного СФ
(материал пластин – сталь, материал вилки – сталь), $d_1 = 4$ мм, $d_2 = 4,8$ мм,
 $l_1 = 7$ мм, $l_2 = 10$ мм, $l_3 = 108$ мм, $l_4 = 7$ мм, $l_5 = 21$ мм, $l_6 = 5,54$ мм

Ток режима, А	Сопротивление КС, Ом	Расчет				Эксперимент
		$\theta_{з.п.}, ^\circ\text{C}$	$\theta_{з.в.}, ^\circ\text{C}$	$\theta_2, ^\circ\text{C}$	$\theta_{КС}, ^\circ\text{C}$	$\theta_{КС.эксп}, ^\circ\text{C}$
2,3	0,2	0,36	0,26	14,7	39,6	39
4,6	0,024	1,4	1,04	7,68	33,5	–
	0,11			32,34	58,09	–
	0,2			58,8	84,5	87
8	0,024	4,3	3,14	21,34	49,19	–
	0,11			97,84	125,6	–
	0,2			177,8	205,7	–

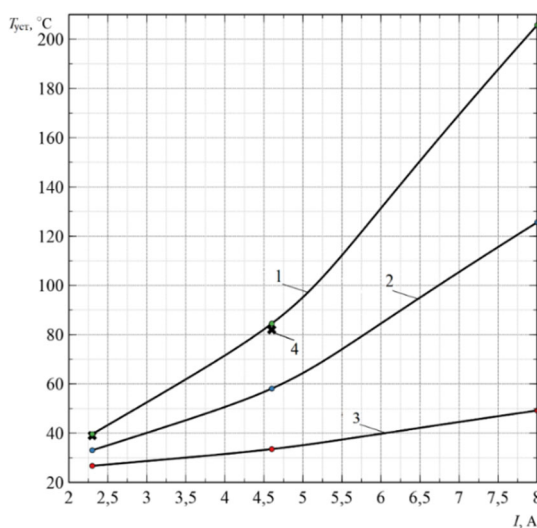


Рис. 3. Зависимость установившейся температуры нагрева проводника в месте КС 3-розеточного СФ от тока нагрузки:

1 – $R_{КС} = 0,2$ Ом; 2 – $R_{КС} = 0,11$ Ом; 3 – $R_{КС} = 0,024$ мОм;
4 – эксперимент при $I_{ном} = 4,6$ А и $R_{КС} = 0,2$ Ом

Установившаяся температура КС указанных типов СФ выборочно проверялась экспериментально в отделе электрооборудования МАКНИИ, г. Макеевка. Для 5-розеточного СФ применялся источник постоянного тока низкого напряжения, поэтому наблюдалась значительная стабильность сопротивления $R_{КС} = 0,33$ Ом, которая достигалась с использованием гильзы из фольгированной меди, предварительно окисленной в растворе перекиси водорода и обработанной пищевой солью. Исследование 3-розеточного удлинителя проводилось при напряжении сети переменного тока 220 В. В этом случае из-за хаотичных циклов разогрева/остывания возникали нерегулярные кратковременные электрические искрения [9].

Электрическая принципиальная схема защиты СФ от перегрева КС представлена на рис. 4.

в каждом месте контакта нежелательна из-за возрастания их количества. Более предпочтителен вариант установки термореле посередине посадочных мест под штепсельные розетки (см. позиции 1–3 на рис. 5)

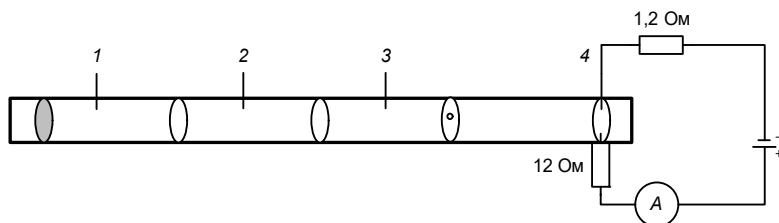


Рис. 5. Схема эксперимента по определению температуры нагрева контактной пластины СФ: 1–4 – номера термодпар

С помощью термодпар 1–4 (рис. 5) и мультиметра APPA109N фиксировалось значение температур нагрева вдоль контактной пластины СФ. Нагрев осуществлялся резистором 12 Ом, подключенным к источнику питания постоянного тока типа ЭП 3.501ОМ.1.3 ЭТАЛОН ПРИБОР.

При этом проведены следующие опыты:

- 1) СФ 5-розеточный, нагрузка – постоянный ток 300 мА, нагрев резистором 12 Ом;
- 2) СФ 5-розеточный, нагрузка – постоянный ток 500 мА;
- 3) СФ 5-розеточный, нагрузка – постоянный ток 700 мА;
- 4) СФ 5-розеточный, нагрузка – постоянный ток 900 мА;
- 5) СФ 5-розеточный, нагрузка – УФО с током ток 13,6 А (контроль нагрева в номинальном режиме).

Рассмотрим зависимости температур нагрева от времени для двух последних опытов (рис. 6 и 7).

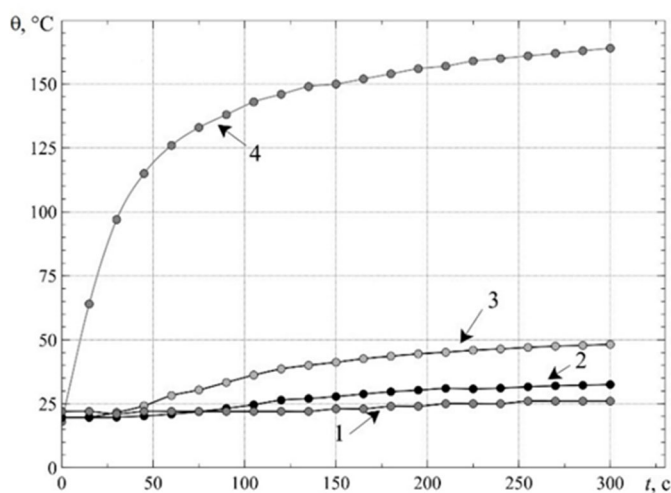


Рис. 6. Нагрев контактной пластины во времени (опыт 4): 1–4 – номера термодпар

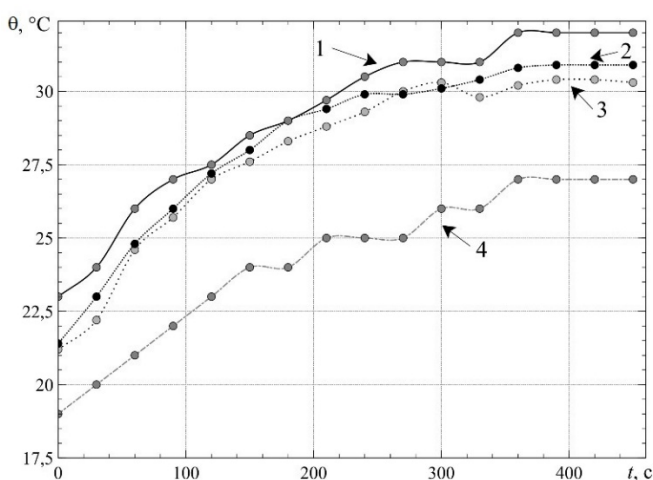


Рис. 7. Нагрев контактной пластины во времени (опыт 5):
1–4 – номера термопар

Их анализ показывает, что в опыте 5 (рис. 8, нормальный режим) максимальный нагрев термопары 1 составляет 32 °C, 2 – 30,9 °C, 3 – 30,3 °C.

В то же время температура плавления полипропилена – 164–170 °C, а поливинилхлорида – 150 °C. Следовательно, при нагреве термопары 4 (опыт 4) до температуры 150–160 °C, термопара 3 (ближайшая к термопаре 4) нагревается до 41,2–46,4 °C, что достаточно для срабатывания термореле с температурным номиналом 45 ± 5 °C. Тогда в устройстве защиты устанавливаются по два термореле в позициях 2 и 3 на каждой из контактных пластин СФ.

Опасность тепловоздействий при искрении проверялась путем ослабления контакта вилкой бытового пылесоса 1,5 кВт – опыт 6 (рис. 8). В позиции 3, где производилось искрение, температура за 390 с достигла 155 °C, а в позиции 4 – 78 °C, причем после периода искрений наблюдается увеличение переходного сопротивления КС и его саморазогрев до более высоких температур.

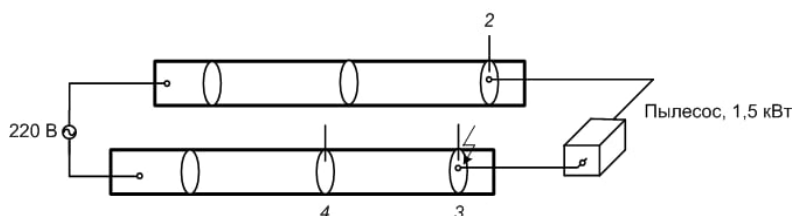


Рис. 8. Схема эксперимента по определению температуры нагрева контактной пластины СФ при искрении вилкой бытового прибора:
2–4 – номера термопар

Узел контроля состояния контактов $SA2...SA5$ с исполнительным реле $K1$ и светодиодной индикацией $VD1$ реализована на элементах $VT1$, $VT2$, $VD5$, $R7...R9$, $R10$, $R11$. В случае перегрева любого из контролируемых соединений

происходит блокировка подачи напряжения потребителю. Данная мера предотвращает самовосстановление работы устройства.

РС цепочка R7, C6 обеспечивает необходимую задержку сигнала на подхват, что снижает вероятность ложных срабатываний при подаче питания на СФ, сбросе защиты и т.д.

Включение кнопки SA1 СФ подает напряжение оперативных цепей 5 В, но при этом напряжение в розетках отсутствует (реле K1 находится в отключенном состоянии). В случае, когда температура КС не превышает допустимую, контакты всех термореле остаются замкнутыми, открывается транзистор VT1, включается реле K1. Подается напряжение к нагрузке СФ. Зеленый светодиод светится, а красный – нет (зашунтирован коллектором VT1).

После срабатывания защиты транзистор VT2 формирует режим «защелка». Так как транзистор VT1 открыт, то потенциал его коллектора соединен с общей цепью (красный светодиод и базы VT2 зашунтированы).

В случае превышения допустимой температуры хотя бы на одном КС СФ происходит срабатывание соответствующего термореле, зеленый светодиод гаснет, закрывается транзистор VT1. Это приводит к обесточиванию нагрузки (реле K1 отключается). Красный светодиод загорается, открывается транзистор подхвата VT2 и своим коллектором шунтирует базу VT1, принудительно закрывая его. При восстановлении температуры до допустимых значений (сработавшее термореле включается) загорается зеленый светодиод (поскольку зеленый и красный светодиоды находятся в одном корпусе, одновременное свечение обоих цветов приводит к появлению желтого цвета), включение реле K1 не происходит из-за действия транзистора подхвата VT2.

Выводы. 1. Большое переходное сопротивление, возникающее на штыревых контактах розеток и СФ, клеммах проводки розеток и СФ, – один из наиболее распространенных пожароопасных режимов электросети. В то же время широко используемые защитные аппараты не обеспечивают контроль нагрева КС внутри корпусов электроизделий.

2. Установившийся температурный перегрев КС типовых 3- и 5-розеточных СФ с номинальным током 10 А в нормальном режиме не превышает 11°C, что дает возможность строить дополнительную защиту на основе термоэлектрического метода контроля (по превышению или разности температур).

3. Экспериментально установлено распределение во времени температуры нагрева контактной пластины СФ при образовании БПС в одном из штепсельных соединений. На основании этого выявлена необходимая температура срабатывания датчиков термореле защиты СФ от перегрева КС – (45±5°C) при различных сочетаниях нагрузочного тока и сопротивления КС. Определены достаточное количество датчиков и места их установки – посередине посадочных мест под штепсельные розетки.

4. Разработана структурная схема защиты СФ от появления БПС, состоящая из механизма прерывания для обесточивания нагрузки 220 В, цепи измерения температуры с порогом срабатывания, отстроенным от режима нормальной эксплуатации, схемы триггера, не допускающего самовосстановление

при нарушении нормальной работы устройства (контроль повреждения), схемы сброса защиты, световой индикации. Размещение схемы защиты может осуществляться в технологических полостях конструкции корпуса СФ.

Литература

1. Дмитриев А.Д., Канайкина К.А., Косенко А.Д. Математическое представление процесса нагрева и охлаждения болтовых контактных соединений // Энергетика: состояние, проблемы, перспективы: материалы XV Всерос. науч. техн. конф. Оренбург: Оренбург. гос. ун-т, 2024. С. 230–236.
2. Зинченко Е.О. Температура нагревания проводников в контактных соединениях электроустановок // Научный вестник НИИГД «Респиратор». 2017. № 3(54). С. 36–47.
3. Исследование защиты от пожароопасного перегрева контактных соединений удлинитель [Электронный ресурс] / И.А. Бершадский, А.Ю. Гладков, Н.А. Савинов, А.Д. Мых // Вестник Донецкого национального технического университета. 2022. № 2(28). С. 39–45. URL: <http://vestnik.donntu.ru/dl/2022/02/bershadsky.pdf> (дата обращения: 10.05.2025).
4. Пат. 207595U1 РФ, МПК H01H 69/00(2006.01). Устройство защиты от перегрева штепсельных соединителей электрических сетей / заявитель и патентообладатель Купцов В.Д., Зубов Б.Н. № 2021116974; заявл. 09.06.2021; опубл. 03.11.2021, Бюл. № 31.
5. Пожары и пожарная безопасность в 2023 г. Статистика пожаров и их последствий // ФГБУ ВНИИПО МЧС России. Балашиха, 2024. 112 с.
6. Солдатов Д.А. Диагностика переходного сопротивления контактов в сети промышленной частоты термоэлектрическим методом: дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2023. 122 с.
7. Справочник по расчету и конструированию контактных частей силовых электрических аппаратов / Н.М. Адоньев, В.В. Афанасьев, В.В. Борисов и др.; под ред. В.В. Афанасьева. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. 384 с.
8. Физические процессы в электрических аппаратах / А.С. Варфоломеева, Н.Н. Кургузов, Л.И. Кургузова и др. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2007. 197 с.
9. Формирование алгоритмов функционирования автоматической системы мониторинга и диагностики электропроводок / С.В. Солёный, О.Я. Солёная, А.П. Ковалёв, Г.В. Демченко // Информационно управляющие системы. 2015. № 2. С. 30–36.
10. US Patent No. 9,716,351 B2 (Jul. 25, 2017). Plug with overheat warning device having a temperature sensor, a control board and an alarm generator. Inventor: Weilin Lu, Applicant: Dong Guan Song Wei Electric Technology Co., Ltd. URL: <https://image-ppubs.uspto.gov/dirsearch-public/print/downloadPdf/9716351> (дата обращения 10.05.2025).

БЕРШАДСКИЙ ИЛЬЯ АДОЛЬФОВИЧ – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой электроснабжения промышленных предприятий и городов, Донецкий национальный технический университет, Россия, Донецк (ibersh164@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7383-3415>).

МЫХ АНАТОЛИЙ ДМИТРИЕВИЧ – аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий и городов, Донецкий национальный технический университет, Россия, Донецк (vip.mych@mail.ru).

Илья А. BERSHADSKY, Anatoliy D. MYKH

A METHOD FOR MONITORING THE THERMAL CONDITION OF A DETACHABLE CONTACT CONNECTION OF A SURGE PROTECTOR

Key words: electric contact, heating, contact plate of a surge protector.

An increase in the resistance of an electrical contact connection in the electrical network of a residential flat causes spot heating or a series of electrical arcs, which often lead to fires. However, this heating is not detected by the usual protective devices implemented in surge protectors and therefore the risk of fires remains.

The purpose of the research is to increase the efficiency of protection of plug contacts of the surge protector from excessive overheating by justifying the parameters of the protective device with thermoelectric effect. Scientific novelty consists in determination of its structural scheme, as well as in obtaining quantitative characteristics of its operation.

Materials and methods. The object of the research is electric surge protectors. The subject of the research is a schematic solution for protection of a surge protector against overheating of the contact connection, which contributes to the prevention of fires at rated currents. The method of mathematical modelling of conductor heating in the contact connection of the surge protectors, based on the solution of the heat balance equation, as well as methods of analysis and generalisation have been used. To measure the heating temperature of the plates of the disassembled connection of the surge protectors, a group of temperature sensors is installed, the place of installation of which and the setting of the protection operation temperature are determined by experiments.

Results. A mathematical model of conductor heating in a contact connection subject to weakening or degradation, which takes into account its transient resistance, load current strength, dimensions of structural heat dissipating elements, is proposed for a surge protector with a rated current of 10 A. The dependence of the contact connection surface temperature on its transient resistance in emergency and normal operation modes has been determined experimentally. The time characteristic of heating of the contact plate of a 5-socket surge protector, as well as the distribution of its heating along the longitudinal coordinate are established. It is shown that the electrical scheme of the surge suppressor protection from a large transient resistance of the contact system includes a thermorelle installed in the middle of the plug socket seats (two on each contact plate), as well as a trigger circuit to fix the damage and an indication system.

Conclusion. Due to mechanical weakening of tightness of adhesion of surfaces of current-carrying elements, the increase of resistance of contact connection in 6–8 times in relation to the standard leads to overheating of connection up to 160–250 °C with further appearance of short circuit in the network and fires. The given circuit-technical solution of protection of a surge protector from a mode of overheating of a defective contact connection disconnects the network until the moment when melting or burning of non-metallic components of a plug connection can occur. The established temperature overheating of the contact connection of typical 3- and 5-socket surge protectors with rated current of 10 A in normal operation does not exceed 11°C, therefore the additional protection is based on the thermoelectric method of control (by excess or difference of temperature). The required temperature of triggering of sensors of thermo relay of this protection is $45 \pm 5^\circ\text{C}$ at various combinations of load current and resistance of contact connection, which allows to make a tune-up against undesirable starts in normal load modes.

References

1. Dmitriev A.D., Kanaikina K.A., Kosenko A.D. *Matematicheskoe predstavlenie protsessa nagreva i okhlazhdeniya boltovykh kontaktnykh soedinenii* [Mathematical representation of heating and cooling of bolted contact connections]. In: *Energetika: sostoyanie, problemy, perspektivy: materialy XV Vseros. nauch. tekhn. konf. Orenburg: Orenburg. gos. un-t* [Proc. of the 15th Russ. Sci. and Tech. Conf. «Power Engineering: State, Problems, Prospects»]. Orenburg, Orenburg State University Publ., 2024, pp. 230–236.
2. Zinchenko E.O. *Temperatura nagrevaniya provodnikov v kontaktnykh soedineniyakh elektroustanovok* [Heating temperature of conductors in contact connections of electrical installations]. *Nauchnyi vestnik NIIGD «Respirator»*, 2017, no. 3(54), pp. 36–47.
3. Bershadskii I.A., Gladkov A.Yu., Savinov N.A., Mykh A.D. *Issledovanie zashchity ot požarnopasnoogo peregreva kontaktnykh soedinenii udlinitelei* [Investigation of protection against fire hazardous overheating of contact connections of extension cords]. *Vestnik Donetskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta*, 2022, no. 2(28), pp. 39–45. Available at: <http://vestnik.donntu.ru/dl/-2022/02/bershadsky.pdf> (Accessed Date: 2025, March 10).
4. Kuptsov V.D., Zubov B.N. *Ustroistvo zashchity ot peregreva shtep-sel'nykh soedinitelei elektricheskikh setei* [Overheating protection device for plug connectors of electrical networks]. Patent RF, no. 207595U1, 2021.
5. *Pozhary i požarnaya bezopasnost' v 2023 g. Statistika požarov i ikh posledstviy* [Fires and fire safety in 2023. Statistics of fires and their consequences]. Balashikha, 2024, 112 p.

6. Soldatov D.A. *Diagnostika perekhodnogo soprotivleniya kontaktov v seti promyshlennoi chasty termoelektricheskim metodom: dis. ... kand. tekhn. nauk*. [Diagnostics of transient contact resistance in industrial frequency network by thermo-electric method: Cand. Diss.]. Tomsk, 2023, 122 p.

7. Afanas'ev V.V., ed., Adon'ev N.M., Afanas'ev V.V., Borisov V.V. *Spravochnik po raschetu i konstruirovaniyu kontaktnykh chastei sil'notochnykh elektricheskikh apparatov* [Reference book on calculation and design of contact parts of high-current electrical apparatuses]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1988, 384 p.

8. Varfolomeeva A.S., Kurguzov N.N., Kurguzova L.I. et al. *Fizicheskie protsessy v elektricheskikh apparatakh* [Physical processes in electrical apparatuses]. Omsk, 2007, 197 p.

9. Solenyi S.V., Solenaya O.Ja., Kovalev A.P., Demchenko G.V. *Formirovanie algoritmov funktsionirovaniya avtomaticheskoi sistemy monitoringa i diagnostiki elektroprovodok* [Formation of algorithms of functioning of the automatic system of monitoring and diagnostics of electric wires]. *Informatsionno upravlyayushchie sistemy*, 2015, no. 2, pp. 30–36.

10. US Patent No. 9,716,351 B2 (Jul. 25, 2017). Plug with overheat warning device having a temperature sensor, a control board and an alarm generator. Inventor: Weilin Lu, Applicant: Dong Guan Song Wei Electric Technology Co., Ltd. Available at: <https://image-ppubs.uspto.gov/dirsearch-public/print/downloadPdf/9716351> (Accessed Date: 2025, March 10).

ILYA A. BERSHADSKY – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Power Supply of Industrial Enterprises and Cities, Donetsk National Technical University, Russia, Donetsk (ibersh164@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7383-3415>).

ANATOLIY D. MYKH – Post-Graduate Student, Department of Power Supply of Industrial Enterprises and Cities, Donetsk National Technical University, Russia, Donetsk (vip.myh@mail.ru).

Формат цитирования: Бершадский И.А., Мых А.Д. Способ контроля теплового состояния разъемного контактного соединения сетевого фильтра // Вестник Чувашского университета. 2025. № 2. С. 17–30. DOI: 10.47026/1810-1909-2025-2-17-30.