

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2021. Т. 30. № 6. С. 108–113
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2021; 30(6):108-113

УДК 614.849/ 311.3

Пожарная опасность больших переходных сопротивлений. От теории к практике. Часть 1

Александр Сергеевич Харламенков ✉

Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации
по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий
стихийных бедствий, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Рассмотрена статистика пожаров от электроустановок по видам электрических изделий. Обоснована необходимость дальнейших поисков технических решений по защите электрических сетей от больших переходных сопротивлений. Представлены основные теоретические положения теории контакта. Показано влияние различных факторов на величину переходного сопротивления. Выполнено обобщение теоретических данных, позволяющих определить пути решения рассматриваемого вопроса.

Ключевые слова: пожарная безопасность; электрооборудование; контакт-деталь; дуговой пробой; эрозия контактов

Для цитирования: Харламенков А.С. Пожарная опасность больших переходных сопротивлений. От теории к практике. Часть 1 // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 6. С. 108-113.

✉ Харламенков Александр Сергеевич, e-mail: h_a_s@live.ru

The fire hazard of large transition resistances. From theory to practice. Part 1

Aleksandr S. Kharlamenkov ✉

The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense,
Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

The statistics of fires at electric plants, broken down by the types of electric products, are considered. The need for a further search for technical solutions towards the protection of electric networks from large transient resistances is substantiated. Basic provisions of the contact theory are presented. The influence of various factors on the value of the transient resistance is shown. The generalization of theoretical data has been carried out, allowing to determine the ways of solving the problem under consideration.

Keywords: fire safety; electrical equipment; contact point; arc over; erosion of contacts

For citation: Kharlamenkov A.S. The fire hazard of large transition resistances. From theory to practice. Part 1. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(6):108-113 (rus.).

✉ Aleksandr Sergeevich Kharlamenkov, e-mail: h_a_s@live.ru



ВОПРОС:

Ежегодные статистические данные о пожарах указывают на высокий уровень пожарной опасности в жилых зданиях, на которые приходится более 70 % всех пожаров [1]. Больше 20 тыс. пожаров происходит в комнатах и спальнях помещений, реже — в кухнях, коридорах, лоджиях (балконах) и ванных комнатах.

По причине нарушения правил эксплуатации электрооборудования и бытовых приборов в жилом секторе ежегодно происходит более 40 тыс. пожаров. На электропроводку приходится около 65 % пожаров среди всех электроустановок. Число пожаров от кабелей в 20–30 раз меньше, чем от проводов [2]. Это связано с большой протяженностью электропроводок по сравнению с кабельными ли-

ниями и более жесткими требованиями к монтажу последних. Кроме этого, собственники помещений зачастую самостоятельно выполняют прокладку электропроводки с значительными нарушениями правил монтажа и пожарной безопасности.

За последние 5 лет количество пожаров от выключателей, электрических розеток, разветвителей, (удлинителей) выросло почти в 2 раза и составляет около 6 % от общего числа пожаров (рис. 1). Это обстоятельство указывает на снижение контроля со стороны собственников помещений к эксплуатируемым электроустановочным изделиям. Рост пожароопасных показателей также связан с использованием электропроводки, выключателей, электрических розеток и удлинителей, которые уже израсходовали свой ресурс и имеют значительный

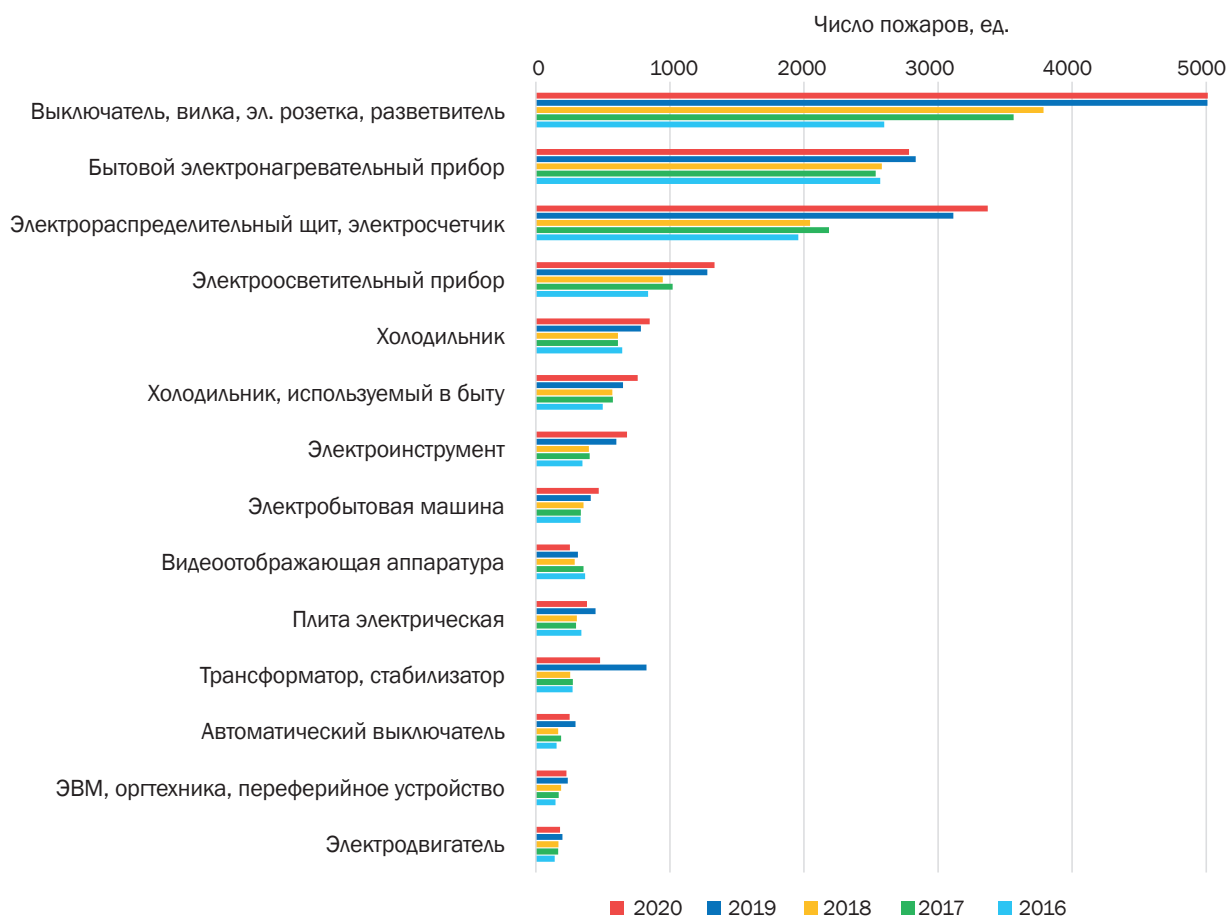


Рис. 1. Пожары от электрических изделий за 2016–2020 гг. [1] (за исключением проводов и кабелей)

износ. При этом количество подключаемой к сети нагрузки и общая потребляемая мощность приборов увеличиваются с каждым годом.

По состоянию на 2018 г. число семей, нуждающихся в улучшении жилищных условий, составляет более 2 млн, из которых только 4 % получили новые квартиры и улучшили свое положение, а более 6 % (121 тыс.) граждан продолжают проживать в ветхих и аварийных домах. В 2018 г. капитального ремонта требовали около 140 тыс. многоквартирных домов [3]. Только в 30 % из них выполнен ремонт, который обычно не включает в себя замену электропроводки, выключателей, розеток и других электроустановочных изделий в жилых помещениях.

Из представленных статистических данных следует, что ожидать улучшения обстановки с пожарами от электрооборудования в жилых зданиях в ближайшие годы не стоит. Поэтому остается надеяться на сознательность и озабоченность своей безопасностью собственников жилья, которым нужно помнить о поддержании в исправном состоянии используемых ими электроустановок.

В первую очередь, необходимо руководствоваться требованиями п. 35 Правил противопожарного режима РФ (ППР РФ)¹, которые указывают на не-

обходимость контроля со стороны собственника за исправным состоянием электрических сетей, аппаратов и устройств, а также бытовых приборов. Наибольшего внимания заслуживают работающие десятилетиями электрические сети и электроустановочные изделия, так как бытовые электрические приборы обновляются в доме чаще. Изоляция и оболочка проводов и кабелей имеет срок службы, в среднем 15–20 лет, который может значительно сокращаться из-за превышения рабочих температур проводника и окружающей его среды. Этот процесс называют старением изоляции. Он подробно рассмотрен в рубрике «Вопрос-ответ» № 1 журнала за 2019 г. [4].

На выход из строя электропроводок, выключателей, розеток и удлинителей влияют и пожароопасные режимы работы электрических сетей. К ним относятся короткие замыкания (КЗ), токовые перегрузки и большие переходные сопротивления (БПС) контактных соединений. Интересно, что появление одного пожароопасного состояния может спровоцировать появление другого. Так, длительная перегрузка обычно приводит к расплавлению изоляции соседних токоведущих жил и последующему появлению КЗ. Замыкание, в свою очередь, характеризуется протеканием по цепи больших токов, которые приводят к нагреву контакт-деталей и увеличению их переходного сопротивления. Наличие «плохого контакта», даже при протекании по цепи рабочего тока, ведет к повышению температуры соединенных про-

¹ Правила противопожарного режима в Российской Федерации (с изм. 21 мая 2021) : утверждены постановлением Правительства РФ от 16 сентября 2020 г. № 1479.

водников, где происходит постепенное разрушение изоляции, что аналогично процессам при токовой перегрузке.

Обнаружение КЗ и токовых перегрузок в большинстве случаев не представляет серьезной проблемы, так как с этой задачей эффективно справляются существующие аппараты защиты в виде плавких предохранителей, автоматических выключателей и тепловых реле. Но с БПС ситуация обстоит иначе. В силу того, что протекающий по сети ток практически не изменяется по величине, то и аппараты защиты никак на него не реагируют. Поэтому выявление мест «плохого контакта» является проблематичным. БПС обычно сопровождается: появлением неприятного запаха от оплавленных элементов электроустановочных изделий или изоляции проводов; нестабильной работой бытовых приборов; периодическим морганием ламп светильников. Перечисленные ситуации характерны не только для случаев появления БПС, но и для перепадов напряжения в электрической сети. В результате имеет смысл рассмотреть актуальный вопрос — какие современные технические решения используются в электрических сетях зданий для обнаружения БПС?

ОТВЕТ

Появление БПС чаще происходит в местах разрывных (разъемных) и скользящих контактов, нежели неподвижных (зажимных и цельнометаллических). Для зажимных контактов также характерно появление БПС в случае некачественного монтажа и/или нарушений регламента технического обслуживания [5]. Ухудшение качества зажимных контактов возможно и при периодически возникающих аварийных режимах в работе электрической сети. Например, при перегрузках или КЗ места болтовых соединений подвергаются нагреву электрическим током, который приводит к появлению значительных механических напряжений. Они, в свою очередь, создают остаточную деформацию и, как итог, ослабление контакта [6]. Для разъемных и скользящих контактов характерен большой износ мест соединения и окисление контактируемых поверхностей, особенно, если контакты большую часть времени находятся в разомкнутом состоянии.

Из теории контактирования известно, что на надежную работу контактов влияет множество факторов. Одним из основных является величина переходного сопротивления, которая может значительно изменяться в зависимости от контактного нажатия, чистоты обработки соединяемых поверхностей, наличия загрязнений, агрессивных

сред и влаги в воздухе, способствующих образованию плохо проводящих поверхностных пленок, температуры окружающей среды, зоны контактирования и самих контактов-деталей, величины тока, протекающего через места соединений проводников, габаритных размеров и физико-химических свойств металла контакт-деталей [7].

Нужно понимать, что переходное сопротивление практически не зависит от габаритных размеров контактируемых поверхностей и уменьшается с увеличением силы контактного нажатия. При наложении одной контактируемой детали на другую их фактическая поверхность механического соприкосновения во много раз меньше видимой. Это обусловлено тем, что реальная поверхность контакт-детали весьма неоднородна и имеет множество микровыступов и углублений. Именно соединение между микровыступами и создает зоны электрического контакта (рис. 2, а).

Такие участки при отсутствии на них оксидных, сульфидных и других пленок с высоким удельным сопротивлением называют а-пятнами, которые образуют зону стягивания с сопротивлением $R_{ст} = \rho/2r_{\phi}$, где ρ — удельное сопротивление материала при заданной температуре контакт-детали, Ом·мм; r_{ϕ} — фактический радиус площадки соприкосновения деталей.

Плотность тока в зонах стягивания намного выше, чем в остальном теле проводника, и может достигать величин 10^7 А/см² [8].

Площадь суммарной фактической поверхности соприкосновения $S_{с.ф}$, м², можно определить по формуле [7]:

$$S_{с.ф} = F_k/H,$$

где F_k — контактное нажатие, Н;

H — микротвердость металла контакт-детали, Па.

Как видно из формулы, чем больше контактное нажатие и ниже микротвердость металла, тем больше площадь соприкосновения $S_{с.ф}$ и, следовательно, меньше величина переходного сопротивления. Увеличение числа контактируемых точек на поверхности контакт-деталей при дополнительном контактном нажатии F_k увеличивает общую контактную площадь, снижая величину переходного сопротивления (рис. 2, б). Микротвердость определяется экспериментальным путем, зависит от вида металла (сплава), его механической обработки и температуры нагрева контакт-деталей. Для меди $H = 590...1470$ МПа, а для латуни и бронзы — $H = 500...1600$ МПа [7].

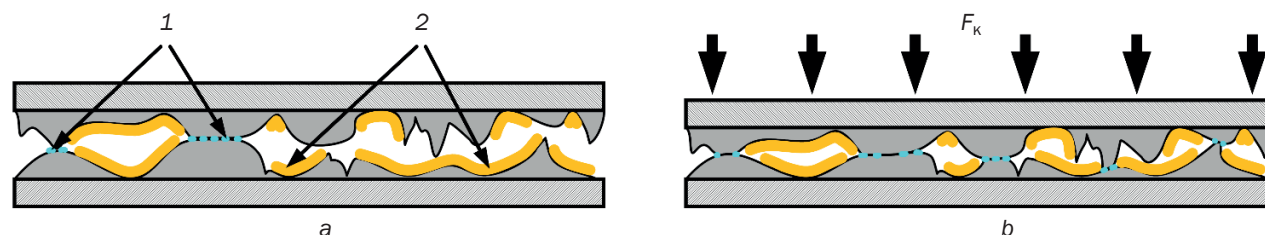


Рис. 2. Соприкосновение двух контакт-деталей: а — без контактного нажатия; б — с контактным нажатием F_k ; 1 — тонкие (квасиметаллические) пленки; 2 — толстые (оксидные, сульфидные) пленки

Помимо зоны металлического контакта с сопротивлением $R_{ст}$ всегда присутствуют зоны с тонкими пленками (квазиметаллические), обычно представляющие собой поверхностные адгезионные слои атомов кислорода, образующиеся в результате воздействия воздуха на чистую поверхность металла. Их наличие увеличивает общее сопротивление контакта. Для контакт-деталей, выполненных из меди, алюминия и их сплавов, сопротивление квазиметаллической зоны намного больше, чем $R_{ст}$.

Более толстые пленки органического и неорганического происхождения образуются в местах отсутствия физического контакта между деталями, а также в случае электрических (дуговых) разрядов при коммутации контакт-деталей. Сопротивление таких пленок на несколько порядков выше сопротивления зоны «чистого» металлического контакта. В результате, общее переходное сопротивление будет представлять суммарное сопротивление параллельно соединенных поверхностей с их сопротивлениями стягивания. Сопротивление пленок в расчетах переходных сопротивлений учитывается в виде повышающего коэффициента. Для различных пар металлов и типов контактов этот коэффициент подбирается отдельно.

В общем виде переходное сопротивление для хорошо зачищенного от оксидов контактных поверхностей можно выразить формулой [7, 8]:

$$R_{пер} = k/F_k^n,$$

где k — коэффициент, зависящий от физических свойств металла контакт-детали, степени ее окисления и вида контакта (табл. 1);

n — коэффициент, определяемый опытным путем для различных видов контактов, который колеблется в пределах от 0,5...0,7 (табл. 2).

По причине наличия у разъёмных контактных поверхностей слоя оксидных пленок сила нажатия F_k будет играть определяющую роль в обеспечении надежного контакта. Она должна быть такой, чтобы преодолеть упругую и добиться пластической деформации, при которой часть тонких и оксидных пленок будет разорвана. При этом увеличится количество точек соприкосновения, а значит, и фактическая площадь контактирования. Чем меньше контактных точек, тем большая плотность тока будет приходиться на каждую из них. Наличие пленок будет увеличивать общее контактное сопротивление и количество выделяемого тепла в местах действительного соприкосновения.

Присутствие пыли на поверхностях замыкаемых контактов может значительно увеличивать переходное сопротивление и снижать качество соединения. Так, в случае упругого взаимодействия между латунными контактами и частицами пыли диаметром 10...20 мкм, вероятность отказа возрастает на 15 % при концентрации пыли 20 частиц на 1 мм². Увеличение концентрации пыли до 50 частиц на 1 мм² повышает вероятность отказа в 3 раза [9].

Для окисляющихся материалов (сталь, медь, алюминий и др.) температура контактов при их длительной работе

должна находиться в диапазоне 50...70 °С и не должна превышать 80 °С [7]. Превышение данного температурного режима будет сопровождаться резким возрастанием скорости коррозии из-за активного образования пленок. Ограничение температуры контактов обусловлено рабочими режимами диэлектриков (пластиков), используемых в конструкциях электроустановочных изделий [8].

При дальнейшем увеличении температуры (протекающего тока) переходное сопротивление плавно растёт,

Таблица 1. Значения коэффициента k для различных пар контакт-деталей (при отсутствии оксидных пленок) [7]

Вид металла пары контакт-деталей	Значение коэффициента $k \cdot 10^{-3}$
Медь – медь*	0,14...0,18
Медь – медь**	0,08...0,14
Медь – медь***	0,07...0,10
Медь – латунь	0,38
Латунь – латунь	0,67
Латунь – сталь	3,04
Медь – сталь	3,1
Сталь – сталь	7,6
Алюминий – алюминий	0,127
Алюминий – латунь	1,85
Алюминий – сталь	4,4
Алюминий – медь	0,98
* Точечный контакт.	
** Плоский контакт.	
*** Луженые поверхности.	

Таблица 2. Значения опытного коэффициента n для контактов различного вида [7]

Вид контакта	Значение коэффициента n
Розеточный	0,75
Линейный	0,7
Стыковой	0,5...1,0
Пакетно-пластинчатый	1,0
Пальцевый	0,5...0,67
Контакты «шар – шар», «шар – плоскость»:	
при пластической деформации	0,5
при упругой деформации	0,33
Разборное контактное соединение	0,5...0,7

а в месте с ним и падение напряжения на контактах ΔU . При достижении некоторой пороговой величины $\Delta U_{кр}$ переходное сопротивление начинает уменьшаться (для меди $\Delta U_{кр} = 0,09...0,13$ В [8]). Это связано с достижением температуры, при которой в месте контакта происходит потеря прочности металла и его рекристаллизация. Контактирующие выступы начинают размягчаться, и площадь фактического контакта увеличивается. Температура рекристаллизации для меди составляет $150...270$ °С, для латуни — $250...350$ °С. При температурах выше критической (400 °С) у большинства металлов происходит сильное размягчение и возможно последующее расплавление в зоне контакта.

Ослабление контакта в местах расплавления металла и наличия оксидных пленок может приводить к появлению дуговых пробоев, образующих еще больше мест плавления, вокруг которых быстро формируются пленки. При напряжениях немного ниже $\Delta U_{кр}$ (напряжение фриттинга) может происходить локальный пробой пленок с резким возрастанием тока и таким же снижением сопротивления, которое будет продолжаться до установления в цепи напряжения $0,3...0,5$ В [6, 8, 10]. При этом наблюдается образование проводящих металлических мостиков (мостиковая эрозия), которые при дальнейшем соединении и разъединении контактов изменяют рельеф их поверхности и снижают надежность соединения. Явление пробоя толстых пленок обычно называют А-фриттингом, а тонких — В-фриттингом. Установлено, что определяющим фактором возникновения фриттинга является достижение определенной величины напряженности поля $E \approx 10^6$ В/см (для окисных пленок) [6, 10]. Протекание зарядов через узкие диэлектрические зазоры в пленках при мостиковой эрозии осуществляется за счет термоэлектронной эмиссии (выбивания электронов из металла) и туннелирования [11].

Более сильный дуговой пробой (ДП) приводит к дуговой эрозии и определяет коммутационный ресурс контакта. Электрическая дуга вызывает нагрев, плавление и испарение контакт-деталей, а также перенос части метал-

ла одного контакта на другой с образованием впадин и бугорков на контактных поверхностях. Наибольший негативный эффект от ДП наблюдается при размыкании контактов [7]. Наличие емкости и индуктивности в цепи способствует появлению ДП при коммутации. Образование дуги возможно при достижении определенных токов и напряжений в контакт-деталях. Для меди явление дуговой эрозии следует учитывать при напряжении и токе, превышающих 25 В и $1,3$ А. В момент размыкания в случае отсутствия с цепи индуктивности при меньших значениях напряжения и тока дуга не образуется, а возникает мостиковая эрозия [8].

Исследования показали, что при уменьшении площади перекрытия плоских контактов в сочетаниях материалов медь – медь, медь – латунь и медь – нержавеющая сталь, самые высокие показатели контактных сопротивлений и температуры нагрева контакт-деталей были определены у пары медь – латунь, а самые малые — у пары медь – медь. При размыкании контактов электрическая дуга в паре медь – латунь при идентичных условиях формировалась намного чаще, чем у остальных пар [12].

По представленным выше сведениям можно заключить, что основные практические способы обнаружения БПС можно реализовать путем контроля (мониторинга):

- силы контактного нажатия;
- температуры контакт-деталей и мест их соединения;
- падения напряжения или переходного сопротивления в контактном соединении;
- температуры изоляционных материалов и конструктивных элементов электрических изделий, соприкасающихся или находящихся вблизи контакт-деталей;
- появления электрической дуги (искрений) в местах ослабления контактов;
- внешнего вида и наличия деформаций, повреждений, запыленности, окисления разъемных элементов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пожары и пожарная безопасность в 2020 году. Статистический сборник / под общ. ред. Д.М. Гордиенко. М. : ВНИИПО. 2021. 112 с.
2. Смелков Г.И. Пожарная опасность электропроводок. М. : ООО «Кабель», 2009. 328 с.
3. Жилищное хозяйство в России. 2019. Статистический сборник. М., 2019. 78 с.
4. Харламенков А.С. Нагревостойкость изоляции электроустановок // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2019. Т. 28. № 1. С. 77–79.
5. Смелков Г.И. Пожарная опасность электропроводок при аварийных режимах : учебное пособие. М. : Энергоатомиздат, 1984. 184 с.
6. Материалы в приборостроении и автоматике : справочник. 2-е изд. М. : Машиностроение, 1982. 528 с.
7. Адоньев Н.М., Афанасьев В.В., Борисов В.В. и др. Справочник по расчету и конструированию контактных частей силовых электрических аппаратов / под ред. В.В. Афанасьева. Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1988. 384 с.
8. Бондаренко И.Б., Гатчин Ю.А., Иванова Н.Ю., Шилкин Д.А. Соединители и коммутационные устройства : Учебное пособие. СПб. : СПбГУ ИТМО, 2007. 151 с.

9. Lyuminarskaja E., Lyuminarsky I., Selivanov K. Theoretical study of electrical contact dustiness impact on the transition resistance // MATEC Web Conf. 2018. Vol. 224. 6 p.
10. Сафонов Л., Сафонов А. Электрические прямоугольные соединители. Фриттинг окисных пленок на электрических контактах // Технологии в электронной промышленности. 2001. № 3. С. 44-49.
11. Сорокин В.С., Антипов Б.Л., Лазарева Н.П. Материалы и элементы электронной техники. Проводники, полупроводники, диэлектрики : учебник. Т. 1. 2-е изд., испр. СПб. : Лань, 2015. 448 с.
12. Hadziefendic N., Davidovic M., Djordjevic V., Kostic M. The impact of an incomplete overlap of a copper conductor and the corresponding terminal on the contact temperature // IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology. 2017. Vol. 7. No. 10. Pp. 1644–1654. DOI: 10.1109/TCPMT.2017.2720421

Материал поступил в редакцию 01.12.2021

Received December 1, 2021

Информация об авторе

ХАРЛАМЕНКОВ Александр Сергеевич, заместитель начальника кафедры специальной электротехники, автоматизированных систем и связи, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 763967; e-mail: h_a_s@live.ru

Information about the author

Aleksandr S. KHARLAMENKOV, Deputy Head of Department of Special Electrical Engineering, Automation Systems and Communication, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 763967; e-mail: h_a_s@live.ru