УДК 614.84/621.3

Целесообразность применения устройств защиты от дугового пробоя

© А.С. Харламенков✉

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)

АННОТАЦИЯ

Рассмотрены международные и российские нормативные документы, определяющие порядок применения устройств защиты от дугового пробоя (УЗДП) в электроустановках жилых и общественных зданий. Представлен обзор научных исследований эффективности работы УЗДП. Даны примеры возникновения дуговых пробоев с последующим анализом их пожарной опасности. Показаны случаи возможных ложных срабатываний УЗДП и способы снижения таких отключений. Проведено обобщение исследовательских данных о работе УЗДП и сделаны соответствующие выводы.

Ключевые слова: источник зажигания; короткое замыкание; джоулево тепло; пожарная опасность; кабельные изделия; микропроцессорная техника

Для цитирования: *Харламенков А.С.* Целесообразность применения устройств защиты от дугового пробоя // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 2. С. 117-122.

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

The expediency of using arc-fault detection devices

© Aleksandr S. Kharlamenkov✉

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)

ABSTRACT

International and Russian regulatory documents, setting the rules of application of arc-fault detection devices (AFDD) to electrical installations serving residential and public buildings, are considered. An overview of scientific research into the effectiveness of AFDDs is presented. Cases of arcovers are provided, followed by the analysis of their fire hazard. Cases of possible false alarms of AFDDs and methods of reducing the number of such shutdowns are demonstrated. The research data on AFDD operation are generalized and respective conclusions are drawn.

Keywords: ignition source; short circuit; Joule heat; fire hazard; cable products; microprocessor technology

For citation: Kharlamenkov A.S. The expediency of using arc-fault detection devices. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(2):117–122 (rus.).

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

ВОПРОС

Последние 5 лет в Российской Федерации пожары от электроустановок занимают лидирующее место и составляют более 34 % от их общего числа[1]. Около 90 % этого объема приходится на жилой сектор, где основной причиной пожаров являются неисправности кабельных изделий, электроустановочных устройств (электрические розетки, вилки, выключатели, разветвители и т.п.) и осветительных приборов.

Как известно, к пожароопасным проявлениям электрической энергии можно отнести токовые перегрузки, короткие замыкания и большие переходные сопротивления в местах контактных соединений. Указанные аварийные режимы работы электрических сетей сопровождаются появлением искрений и локальными перегревами проводников, способствующих развитию пожара.

Помимо прочего, следует считать пожароопасным процесс перехода искрения в кратковременный дуговой пробой (ДП), возникающий в местах нарушения изоляции или разрыва одной из токоведущих жил. Для предотвращения развития такого процесса разработаны и активно внедряются в эксплуатацию устройства защиты от дугового пробоя (УЗДП) или устройства защиты от искрения (УЗИС).

С 1 июля 2021 г. вводится в действие Изменение № 4 к СП 256.1325800.2016[2], которое требует

[1] Пожары и пожарная безопасность в 2019 году. Статистический сборник / под общ. ред. Д.М. Гордиенко. М. : ВНИИПО, 2020. 80 с.

[2] Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа (с Изменениями 1, 2, 3) : (СП 256.1325800.2016) : утвержден Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 29 августа 2016 г. № 602-пр и введен в действие 2 марта 2017 г.

применения УЗДП для защиты распределительных и групповых цепей жилых и общественных зданий от пожара. Аналогичные дополнения планируется внести в обновленную версию вступивших в силу с 1 января 2021 г. Правил противопожарного режима в РФ[3] (далее — ППР). До 9 апреля 2021 г. проходит публичное обсуждение вносимых в ППР изменений, среди которых предлагается в п. 35 добавить подпункт «к». Согласно этому пункту, запрещается «*эксплуатировать электрические сети и оборудование зданий дошкольных образовательных организаций, специализированных домов престарелых и инвалидов (неквартирные), больниц, спальных корпусов образовательных организаций с наличием интерната и детских организаций, многоквартирных жилых домов, а также зданий общеобразовательных организаций без устройств защиты от дугового пробоя*». Следовательно, установка УЗДП станет обязательной для зданий классов функциональной пожарной опасности Ф.1.1 и Ф.4.1.

Насколько обосновано и целесообразно применение УЗДП в электрических сетях жилых и общественных зданий с целью предотвращения возникновения пожара?

ОТВЕТ

Первые модели УЗДП (AFCI, а позднее AFDD) появились на территории США и Канады в 1999–2002 гг. [1] с выходом первых изданий национальных стандартов этих стран на данную продукцию. Но наибольшее распространение AFDD получили только в 2014 г. в США[4] и с 2015 г. в Канаде[5], где установка таких устройств требуется на всех ответвлениях, питающих розетки или устройства, установленные в жилых домах и общественных зданиях. Зарубежными нормами предлагается в основном установка устройств комбинированного типа, включающего в себя функции автоматического выключателя и УЗДП. В Великобритании обязательное применение AFDD началось только в 2018 г., а к 2021 г. устройство добралось и до России. Почему не раньше?

Одна из причин — это особенности строительства жилых и общественных зданий в США и Канаде. Ко второй можно отнести отсутствие статистических данных, указывающих на снижение числа пожаров за счет применения УЗДП.

Жилые дома США в основном представляют собой здания с деревянным каркасом, обшитые панелями из фанеры и ориентированно-стружечных плит (ОСБ, ОСП, OSB). Прокладка электропроводки в таких домах выполняется непосредственно через горючие конструкции каркаса без гофрированных поливинилхлоридных (ПВХ) или металлических труб, за исключением регионов, где обитает значительное количество грызунов. Соединение отдельных проводов между собой осуществляется с помощью колпачков типа СИЗ (соединительный изолирующий зажим). Очевидно, что любое нарушение целостности изоляции и ослабление контактных соединений в рассматриваемых зданиях могут привести к воспламенению окружающей горючей нагрузки. Поэтому установка УЗДП для защиты от пожара строений, возведенных по каркасно-панельной технологии, может считаться целесообразной.

Во многих европейских странах и России наибольшее распространение имеют дома из цельного бруса, кирпича, железобетонных панелей и пеноблоков. В таких зданиях далеко не каждое искрение проводки способно привести к пожару. Это положение дел указывает на неоднозначность применения УЗДП с целью снижения числа пожаров в жилищном строительстве.

Касательно статистических данных о пожарах в результате ДП можно сказать только одно — их нет и, скорее всего, никогда не будет. Такое явление, как электрическое искрение с кратковременным появлением дуги, на фоне тех же коротких замыканий при проведении расследования причин пожаров останется просто незамеченным. Но статистику появления ДП при работе электрических сетей собрать возможно,. Например, выполнить подсчет числа срабатываний УЗДП в жилых и общественных зданиях какого-либо региона страны, рассмотренного в качестве пилотного проекта. При этом потребуется решить вопрос об исключении ложных срабатываний из общего количества случаев отключения УЗДП. К сожалению, такая исследовательская работа потребует значительных человеческих и финансовых ресурсов и, вероятно, останется существовать только в теории. Следовательно, необходимость применения УЗДП для предотвращения возникновения пожаров, статистические данные о которых отсутствуют, выглядит неубедительно и беспочвенно [2].

В то же время, появление ДП способствует переходу рабочего режима электрической сети в аварийный. Различают два варианта ДП: параллельный и последовательный (рис. 1).

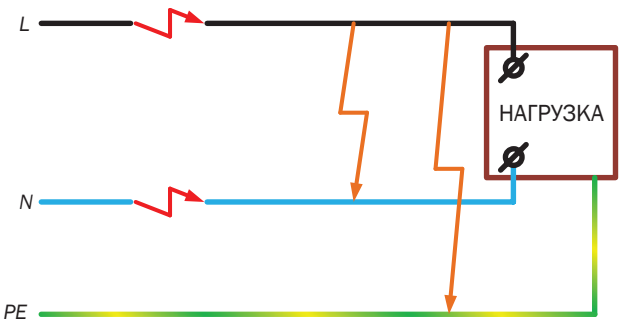

Рис. 1. Разновидности дугового пробоя в однофазной электрической цепи

[3] Правила противопожарного режима в Российской Федерации (с изм. 31 декабря 2020 г.) : утверждены постановлением Правительства РФ от 16 сентября 2020 г. № 1479.

[4] NFPA 70. National Fire Protection Association. National Electrical Code. Section 210.12. NFPA – 2020.

[5] CSA C22.1-15. Canadian Electrical Code. Part I. Safety Standard for Electrical Installations. CSA – 2015. C. 22. 1–15.

Параллельные пробои характеризуются бóльшими токами по сравнению с последовательным образованием дуги из-за отсутствия активной нагрузки потребителя. Автоматические выключатели в большинстве случаев способны отключить такое «мини» короткое замыкание между фазным *L* и нулевым *N* проводниками до наступления пожароопасного режима. Пробой на заземляющий провод *PE* с *L* или *N* провод эффективно обнаруживается при помощи устройства защитного отключения (УЗО) [3].

Больше всего вопросов возникает при анализе эффективности УЗДП по обнаружению последовательных ДП. Они характеризуются протеканием малых токов по причине наличия в цепи большого сопротивления нагрузки. Существующие аппараты защиты зачастую не способны обнаруживать такие нарушения нормального режима работы сети. Кроме того, часть последовательных ДП, имеющих место при работе электрических машин, размыкании/замыкании электрических аппаратов и подключении/отключении приборов, считаются непожароопасными [4] и учитываются при проектировании электрических сетей. Поэтому появление последовательных ДП следует ожидать в местах повреждения изоляции одной из жил кабеля/провода, соединения проводников, розеток с вилками и т.п., где коммутационный процесс носит нестационарный характер и имеет большую интенсивность [5].

Искрение между проводниками при слабом контакте обычно не происходит и возможно только при подключении к сети потребителей с большим индуктивным и емкостным сопротивлением, которые при работе создают нежелательные помехи. Примером таких потребителей может служить стиральная машина с различными автоматическими режимами работы. Но даже ее негативное влияние на сеть значительно снижено за счет установки практически на всех современных моделях помехоподавляющих фильтров, что значительно снижает вероятность появления последовательных ДП. При длительной эксплуатации проводки в ослабленных контактных соединениях вероятность пожара от локальных перегревов с выделением джоулева тепла будет намного выше, чем от ДП. Повышенное переходное сопротивление, в свою очередь, может только способствовать ускорению износа изоляционных материалов проводника. Таким образом, наиболее частое появление ДП можно ожидать в случае повреждения или старения изоляции одной из жил (*L* или *N*).

В ГОСТ IEC 62606–2016[6] представлен ряд испытаний, направленных на определение эффективности срабатывания УЗДП. В табл. 1 указывается максимальное время отключения УЗДП при низких токах дуги (2,5...63 А), характерных для последовательного ДП. Они соответствуют выделению в области разряда энергии 3,75 Дж, способной воспламенить изоляцию провода марки NYM 3×2,5. Для других вариантов кабельных изделий значения энергии зажигания могут отличаться [1].

Из табл. 1 следует, что в качестве минимального значения тока дуги принимается 2,5 А, которое способно негативно воздействовать на материал изоляции в течение 1 с. В то же время проведенные исследования [6] показывают, что ДП величиной 0,9...1,7 А способны приводить к перегреву, обугливанию (карбонизации) и дальнейшему воспламенению ПВХ изоляции. Изоляция из сшитого полиэтилена разрушается при более высоких значениях токов [4]. Следовательно, режимы испытаний параметров срабатывания УЗДП по ГОСТ IEC 62606–2016 учитывают не все возможные пожароопасные варианты последовательных ДП.

При параллельном пробое стандарт не определяет максимальное время срабатывания для УЗДП, но устанавливает максимальное количество полуволн, на которые должна накладываться дуга за 0,5 с в диапазоне действующих (среднеквадратичных) значений токов 75...500 А (табл. 2). Это объясняется тем, что при синусоидальной форме входного напряжения дуга может загораться не в каждой полуволне.

Могут возникать параллельные ДП со множеством пропущенных полуволн (рис. 2). При ДП в моменты смены полярности форма идеальной синусоиды изменяется и создает участки (плечи), где ток отсутствует (см. рис. 2). При благоприятных условиях может сформироваться новый ДП, но его возникновение будет носить случайный характер.

[6] ГОСТ 31565–2012. Кабельные изделия. Требования пожарной безопасности : принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 24 мая 2012 г. № 41) и введен в действие 1 января 2014 г.

Таблица 1. Предельные значения времени отключения для УЗДП на $U_{ном}$ = 230 В

Испытательный ток дуги, А (действующее значение)	2,5	5,0	10,0	16,0	32,0	63,0
Максимальное время отключения, с	1,00	0,50	0,25	0,15	0,12	0,12

Таблица 2. Максимально допустимое число полуволн дуги в течение 0,5 с для УЗДП на $U_{ном}$ = 230 В

Испытательный ток дуги, А (действующее значение)	75	100	150	200	300	500
Число *N* полуволн при номинальной частоте 50/60 Гц	12	10	8	8	8	8

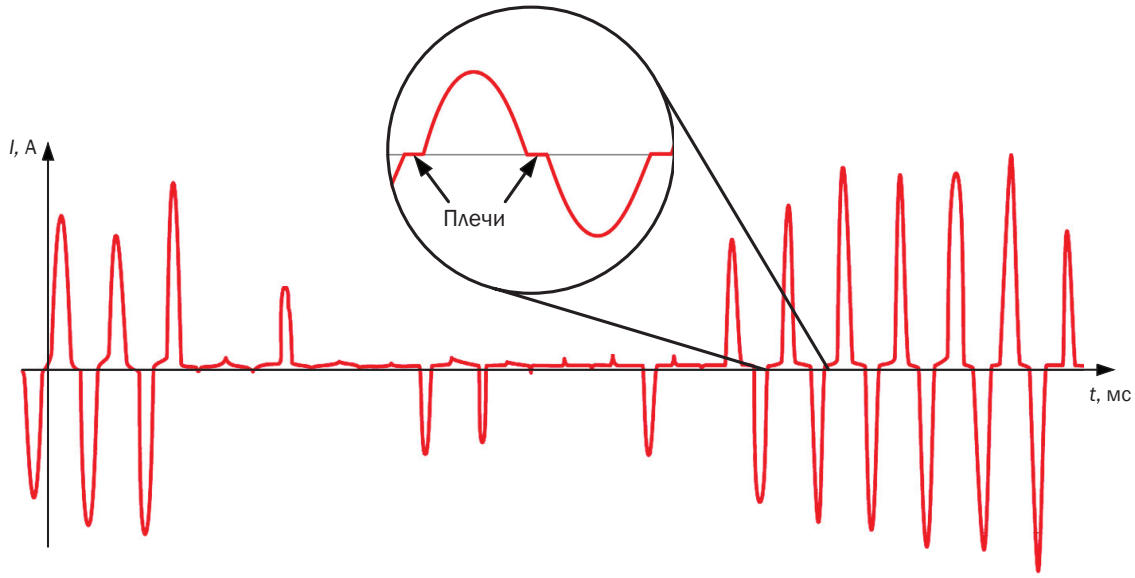

Рис. 2. Форма искаженного синусоидального сигнала с образованием дугового пробоя

На появление ДП оказывает влияние множество факторов. Это — наличие обугленных участков изоляции из-за длительных перегрузок или плохого контакта, температура окружающей среды, наличие/отсутствие теплоизолирующих материалов вокруг электропроводки и, конечно же, фоновые помехи, вызванные работой бытовых приборов. Для исключения ложных срабатываний УЗДП и эффективного обнаружения ДП по ГОСТ IEC 62606–2016 должен выполняться ряд испытаний. Они включают в себя подключение различных видов нагрузки:

- пылесос на 5 — 7 А при $U_{ном}$ = 230 В;
- источник питания с электронной коммутацией на ток не менее 2,5 А при $U_{ном}$ = 230 В;
- электродвигатель с пусковым конденсатором (например, воздушный компрессор) мощностью 2,2 кВт;
- электронный тиристорный регулятор (диммер) яркости ламп накаливания (вольфрамовая нить) на 600 Вт при $U_{ном}$ = 230 В с учетом определенных рабочих циклов;
- две флуоресцентные лампы 40 Вт и дополнительная активная нагрузка с током в 5 А;
- галогеновые лампы по 12 Вт, общей мощностью не менее 300 Вт, питаемые от электронного трансформатора, с дополнительной активной нагрузкой 5 А;
- электрический ручной инструмент (например, дрель) мощностью не менее 600 Вт.

Фоновые помехи данных нагрузок при их работе в штатном режиме могут быть схожи с помехами от ДП. При наложении дополнительного сигнала, получаемого с помощью дугового генератора или экспериментального обугленного кабеля, УЗДП должно отключить цепь за время, указанное в табл. 1. Каждое УЗДП испытывают всего лишь трижды для каждой конфигурации нагрузки. Такой объем выборок не позволяет сделать достоверный статистический вывод о работоспособности испытуемого устройства [3].

Анализ работы вышеперечисленных потребителей показал, что при одних и тех же условиях испытаний два (или более) последовательных ДП могут иметь совершенно разные длительности дугового разряда и, следовательно, разные уровни рассеиваемой энергии [7]. Важно, чтобы стандартные испытания были направлены на получение временно-устойчивых ДП, которые связаны с более высокой вероятностью возгорания в электрической цепи. В качестве критериев, создающих пожарную опасность, для каждого полупериода сети были выбраны:

- минимальное напряжение дуги — более 10 В;
- минимальный ток дуги — более 1 А [6];
- минимальное действующее значение мощности — более 45 Вт.

Результаты исследований [7] показали, что вероятность отключения УЗДП пожароопасной дуги наблюдается практически для всех конфигураций нагрузки, за исключением пылесоса и диммера.

Срабатывание УЗДП происходит после прохождения через микроконтроллер сигнала, обработка которого требует определенного времени. Поэтому наибольшую ценность в конструкции УЗДП представляет программное обеспечение, записанное на чип. Ведь именно метод фильтрации сигналов и скорость их распознавания будут иметь решающее значение при выборе той или иной модели УЗДП. Алгоритмы работы и способы обработки входящих в микроконтроллер данных являются интеллектуальной собственностью фирм-производителей, а значит, сопоставить структуры программного обеспечения не представляется возможным.

На сегодняшний день ведется активный поиск оптимальных способов получения достоверных результатов для надежного обнаружения сигнала при ДП. Наличие фоновой активной (резистивной) нагрузки не создает

проблем в обнаружении ДП. Его можно отфильтровать путем применения метода пик-фактора [8].

Наибольшую проблему представляет обработка сигнала при фоновых помехах от электронных тиристорных регуляторов, формы волн токов которых очень схожи с ДП. Для обнаружения тока ДП при наличии электродвигателей (пылесосы, дрели и т.п.) и нелинейной нагрузки (диммеры) может подойти применение комбинации методов пик-фактора и адаптивного фильтра (сравнение с эталонной моделью) [9, 10]. Аналогичные исследования по поиску надежных методов обнаружения ДП активно ведутся в области оборонной промышленности и авиастроении, где ложные срабатывания могут привести к ЧС с гибелью людей.

В практической деятельности встречаются случаи срабатывания УЗДП от нормально работающих пылесосов, преобразователей частоты, лазерных принтеров, ИБП, а также при воздействии высокочастотных радиосигналов (3...30 МГц). При падении напряжения в сети до значений ниже 100 В УЗДП прекращает свою работу, и отдельные модели устройств остаются в отключенном состоянии даже после повышения напряжения до номинальных значений. Вышеуказанные недостатки снижают общую эффективность применения существующих УЗДП.

Подводя итоги, можно сделать следующие выводы:

1. Статистические данные о пожарах по причине возникновения ДП отсутствуют.
2. УЗДП способны частично выполнять функции автоматических выключателей и эффективно отключать параллельные ДП при величинах тока ниже токов срабатывания тепловых расцепителей.
3. В случае ДП на PE проводник УЗДП дублирует функции устройства защитного отключения (УЗО).
4. УЗДП способны отключать последовательные ДП, но могут давать ложные срабатывания при подключении нелинейной нагрузки и наличии высокочастотных радиопомех.
5. УЗДП не способны обнаруживать пожароопасные участки электрической цепи с большими переходными сопротивлениями, где ДП отсутствует.
6. Исключение ложных срабатываний УЗДП достигается за счет поиска новых и комбинации уже существующих методов обработки входящих на микроконтроллер данных, которые могут значительно отличаться от вида подключаемой в сеть нагрузки.
7. Частое появление ложных отключений сети скорее приведет к тому, что ее подключение будет выполнено в обход УЗДП , нежели длительного поиска причин его срабатывания, которые могут быть вообще не связаны с появлением ДП.
8. Программное обеспечение, позволяющее анализировать входные сигналы электроприборов и надежно отключать их в случае ДП, является интеллектуальной собственностью фирм-производителей, что не позволяет выполнить анализ эффективности срабатывания УЗДП при различных конфигурациях нагрузки.
9. Требования к испытаниям УЗДП по ГОСТ IEC 62606–2016 охватывают не все возможные пожароопасные режимы работы электрических цепей и варианты подключения нагрузки, создающие фоновые помехи.
10. Введение в нормативную документацию обязательности использования УЗДП должно выполняться на основании большого количества натурных испытаний (пилотных проектов), с учетом специфики строительства жилых и общественных зданий в России. Без этого не следует гнаться за последними тенденциями моды и желанием производителей поскорее внедрить и побольше продать якобы «очень полезных» УЗДП.
11. Установка УЗДП имеет смысл только при защите отдельных групповых сетей небольшой протяженности (в пределах одной квартиры или частного дома) или локальных устройств с возможностью проверки отсутствия ложных срабатываний в течение некоторого (пробного) периода времени.
12. Цена на данные устройства в 2–7 раз превышает стоимость автоматических выключателей, УЗО, стабилизаторов и ограничителей напряжения или их комбинаций, что для рядового пользователя является существенным доводом против приобретения УЗДП. В отличие от США, Канады и европейских стран доля жилищного фонда России, находящегося в частной собственности по состоянию на 2019 г., составляет 90 %. Поэтому собственники неохотно согласятся устанавливать себе УЗДП без убедительных доводов в пользу его эффективности и отсутствия ложных срабатываний.
13. В общественных зданиях применение УЗДП не имеет смысла, так как по нормативным документам[7,8] вся электропроводка должна выполняться нераспространяющими горения кабелями с пониженной дымообразующей способностью и/или низкой токсичностью продуктов горения (нг-LS/HF/LTx).
14. Более эффективная защита электрических цепей от появления ДП может быть достигнута за счет периодического контроля состояния изоляции проводов и кабелей, а также выполнения качественного монтажа с учетом мест недостаточного теплоотвода и повышенного нагрева контактных соединений.

[7] Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон Российской Федерации (в редакции от 27 декабря 2018 г.) от 22 июня 2008 г. № 123-ФЗ : принят Государственной Думой 4 июня 2008 г.; одобрен Советом Федерации 11 июля 2008 г.

[8] ГОСТ 31565–2012. Кабельные изделия. Требования пожарной безопасности: принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 24 мая 2012 г. № 41) и введен в действие 1 января 2014 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Монаков В.К., Кудрявцев Д.Ю., Смирнов В.В.* Расчет времятоковой характеристики устройства защиты от дугового замыкания/пробоя на основе модели последовательного дугового замыкания при обрыве проводника кабеля // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2016. Т. 25. № 11. С. 45–50. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.11.45-50
2. *Hoare K.* Arc Fault Detection Devices (AFDDs) — Are they worth it? // CIBSE Journal. Nov. 2020. Vol. 11.
3. *Монаков В.К., Кудрявцев Д.Ю.* Электробезопасность: Теория и практика : монография. М. : Инфра-Инженерия, 2017. 184 с.
4. *Martel J.-M*. Series arc faults in low-voltage AC electrical installations (PhD Thesis). Universitatsverlag Ilmenau, 2018. 192 p.
5. *Монаков В.К.* Разработка устройства защиты от дуговых замыканий // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2014. Т. 23. № 8. С. 27–31. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=22670601
6. *Shea J.* Identifying causes for certain types of electrically initiated fires in residential circuits // Fire and Materials. 2011. Vol. 35. Pp. 19–42. DOI: 10.1002/fam.1033
7. *Costin V*., *D'Orchymont V.D., Meunier-Carus J., Rey J-F., Raisigel H*. Arcing persistency measurement for IEC62606 arc-fault detection device certification // 2019 IEEE Symposium on Product Compliance Engineering (SPCE Austin). 2019. DOI: 10.1109/SPCE47297.2019.8950836
8. *Kim C., Russell B.* Analysis of distribution disturbances and arcing faults using the crest factor // Electric power systems research. 1996. Vol. 35. Pp. 141–148. DOI: 10.1016/0378-7796(96)84602-5
9. *Beck J., Nemir D.C.* Arc fault detection through model reference estimation // SAE Technical Paper Series. 2006. DOI: 10.4271/2006-01-3090
10. *Lezama J., Schweitzer P., Weber S., Tisserand E., Joycux P.* Arc fault detection based on temporal analysis // 2014 IEEE 60th Holm Conference on Electrical Contacts (Holm). 2014. DOI: 10.1109/HOLM.2014.7031017

Материал поступил в редакцию 01.04.2021
Received April 01, 2021

Информация об авторе

ХАРЛАМЕНКОВ Александр Сергеевич, старший преподаватель 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, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 763967; e-mail: h_a_s@live.ru

Information about the author

Aleksandr S. KHARLAMENKOV, Senior Lecturer 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, Moscow, Russian Federation; ID RISC: 763967; e-mail: h_a_s@live.ru