



ПРОВЕРКА НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ПРИ ЗАМЫКАНИИ НА ЗЕМЛЮ АППАРАТОВ ЗАЩИТЫ ОТ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ДУГОВОГО ПРОБОЯ И ИСКРОВЫХ ПРОМЕЖУТКОВ

Тюрин^{1,3} А.Н., Солуянов^{1,2,3} Ю.И., Ахметшин^{2,3} А.Р.

¹АО «Татэлектромонтаж», г. Казань, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

³Ассоциация «Росэлектромонтаж», г. Москва, Россия
turinal@rambler.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Разработать лабораторный стенд для испытания аппаратов защиты от параллельного дугового пробоя и искровых промежутков на срабатывание при замыкании на землю. Провести испытания на лабораторном стенде с последующей разработкой требований по применению аппаратов защиты от параллельного дугового пробоя и искровых промежутков на срабатывание при замыкании на землю. МЕТОДЫ. При выполнении поставленной цели были использованы математические и статистические методы анализа. Лабораторные испытания аппаратов защиты от параллельного дугового пробоя и искровых промежутков при разных параметрах сети на корректность срабатывания при замыкании на землю. РЕЗУЛЬТАТЫ. Проведены лабораторные испытания при разных параметрах сети аппаратов защиты от параллельного дугового пробоя и искровых промежутков на корректность срабатывания при замыкании на землю. Осциллографом зафиксирована форма кривой напряжения и тока при замыкании на землю и время срабатывания аппаратов. Испытуемые аппараты продемонстрировали способность распознать и отключить замыкание на землю. Время отключения аппаратов варьируется, однако, не превышает установленных требований. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Разработан лабораторный стенд для проведения испытания аппаратов защиты от параллельного дугового пробоя и искровых промежутков на срабатывание при замыкании на землю. С помощью данного стенда существует возможность проверки аппаратов на адекватность срабатывания при замыкании на землю с последующей сертификацией. Проведенные испытания демонстрируют необходимость разработки обязательных требований к аппарату для стандартизации их алгоритма работы. Установлено, что аппарат защиты позволяет отключить параллельный дуговой пробой на землю и таким образом повысить безопасность эксплуатации электрических сетей до 0,4 кВ с целью уменьшения количества пожаров, вызванных нарушением правил устройства и эксплуатации электрооборудования.

Ключевые слова: устройства защиты; пожарная безопасность; распределительные сети низкого напряжения; короткие замыкания; дуговой пробой; искрение; УЗДП.

Для цитирования: Тюрин А.Н., Солуянов Ю.И., Ахметшин А.Р. Проверка на работоспособность при замыкании на землю аппаратов защиты от параллельного дугового пробоя и искровых промежутков // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 4. С. 41-54. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-41-54.

TESTING THE OPERATION OF PROTECTION DEVICES AGAINST PARALLEL ARC BREAKDOWN AND SPARK GAPS IN THE EVENT OF A GROUND FAULT

Tyurin^{1,3} A.N., Soluyanov^{1,2,3} Yu.I., Akhmetshin^{2,3} A.R.

¹JSC «Tatelektromontazh», Kazan, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

³"Roselectromontazh" Association, Moscow, Russia
turinal@rambler.ru

Abstract: THE PURPOSE. Develop a laboratory rig for testing parallel arc fault and spark gap protection devices for tripping in the event of a ground fault. Conduct laboratory rig tests with subsequent development of requirements for the use of parallel arc fault and spark gap protection devices for tripping in the event of a ground fault. **METHODS.** Mathematical and statistical methods of analysis were used to achieve the stated objective. Laboratory tests of parallel arc fault and spark gap protection devices for different network parameters for correct tripping in the event of a ground fault. **RESULTS.** Laboratory tests of parallel arc fault and spark gap protection devices for correct tripping in the event of a ground fault were conducted with different network parameters. The oscilloscope recorded the shape of the voltage and current curve in the event of a ground fault and the tripping time of the devices. The tested devices demonstrated the ability to recognize and disconnect a ground fault. The tripping time of the devices varies, however, does not exceed the established requirements. **CONCLUSION.** A laboratory stand has been developed for testing parallel arc breakdown and spark gap protection devices for operation during a ground fault. This stand makes it possible to test devices for adequate operation during a ground fault with subsequent certification. The tests conducted demonstrate the need to develop mandatory requirements for the device to standardize their operating algorithm. Therefore, the use of this protection device can contribute to safer operation of low-voltage electrical networks by preventing emergency situations and reducing the risk of fires. This is an important technical aspect for improving the reliability and safety of power supply.

Keywords: protective devices; fire safety; low voltage distribution networks; short circuits; arcing; sparking; AFCI; AFDD.

For citation: Tyurin A.N., Soluyanov Yu.I., Akhmetshin A.R. Testing the operation of protection devices against parallel arc breakdown and spark gaps in the event of a ground fault. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (4): 41-54. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-41-54.

Введение (Introduction)

На протяжении последних лет пожары, вызванные нарушением правил устройства и эксплуатации электрооборудования, занимают второе место по частоте возникновения [1]. Дуговые пробой, предшествующие возгоранию и образованию пожаров, делятся на несколько видов (рис. 1): последовательный дуговой пробой; параллельный дуговой пробой фаза-ноль; параллельный дуговой пробой фаза-земля.

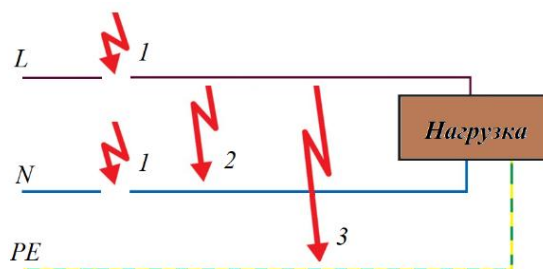


Рис. 1. Дуговые пробой: 1 - последовательный дуговой пробой; 2 - параллельный дуговой пробой фаза-ноль; 3 - параллельный дуговой пробой фаза-земля

Fig. 1. Arc breakdowns: 1 - Serial arc breakdown; 2 - Parallel arc breakdown phase-zero; 3 - Parallel arc breakdown phase-earth

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Последовательный дуговой пробой возникает в результате повреждения токопроводящего проводника («плохой контакт»). Этот вид пробоя достаточно трудно выявить, поэтому он представляет серьезную опасность. При последовательном дуговом пробое протекающий ток в цепи уменьшается, а обычный автоматический выключатель не сработает на снижение величины тока в цепи. Параллельные дуговые пробой «фаза-ноль» и «фаза-земля» сопровождаются увеличением тока в цепи. Время до возгорания при этом может быть настолько коротким, что его не хватит для срабатывания обычного аппарата защиты, способного отключить поврежденный участок цепи [2, 3].

С целью исключения пожаров, вызванных дуговыми пробоями, разработано и успешно внедряется специальное устройство защиты при дуговых пробоях и искровых промежутках (УЗДП) [4, 5].

УЗДП – это специализированное электронное устройство, которое постоянно контролирует работу защищаемого участка электросети. Его основная задача - предотвращение возникновения пожара путем обнаружения и устранения дугового пробоя (искрения). Когда прибор фиксирует наличие дугового пробоя, анализируя сразу несколько параметров сети: силу тока, напряжение, форму, полярность и длительность сигналов, он автоматически отключает соответствующую линию, на которой была выявлена неисправность, предотвращая, таким образом, возгорание. При этом устройство не реагирует на импульсы с параметрами ниже заданных производителем пороговых значений [3-7].

УЗДП не способны обнаруживать замыкание на линии и перегрузку по току. Поэтому они не заменяют, а дополняют традиционные автоматические выключатели (АВ) и устройства защитного отключения (УЗО), которые выполняют эти функции (рис. 2).

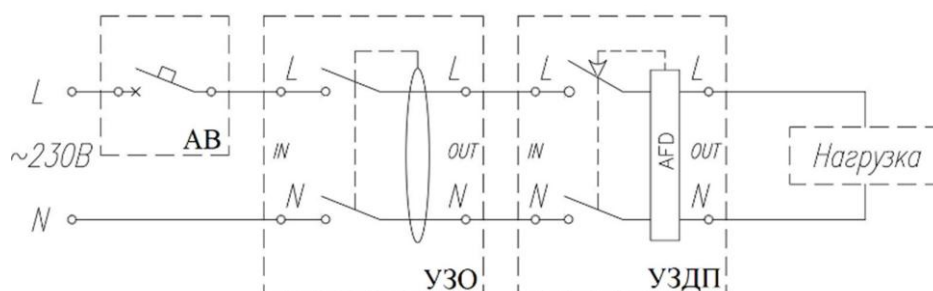


Рис. 2. Подключение двухполюсного УЗДП, Fig. 2. Connecting a two-pole AFCI, single-pole AB, однополюсного АВ, двухполюсного УЗО two-pole RCD

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Основными элементами УЗДП являются электронный блок обнаружения дугового пробоя и механизм отключения защищаемой цепи. Блок обнаружения дугового пробоя контролирует силу тока в цепи с помощью токовых трансформаторов и мгновенное напряжение в сети, при обнаружении признаков дугового пробоя через тиристорный ключ приводит в действие расцепитель и отключает нагрузку (рис. 3).



Рис. 3. Блок обнаружения дугового пробоя Fig. 3. Arc fault detection unit

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Применение УЗДП получило широкое распространение во многих странах. Так, в Соединенных Штатах Америки УЗДП стали обязательными к применению в жилых домах еще с 2001 г., предписывая их установку во всех электрических цепях жилых зданий, за исключением ванных комнат, гаражей и уличных электропотребителей. С

2017 г. в Федеративной Республике Германии УЗДП являются обязательными в ряде помещений жилых и общественных зданий, таких как спальни, помещения с горючими материалами, общественные места с большим скоплением людей.

Первые модели УЗДП появились в Российской Федерации в 2017 году. К 2021 году несколько отечественных и зарубежных производителей наладили их серийный выпуск (рис. 4).

УЗДП производства Соединенных Штатов Америки, устанавливаемые в щитах, имеют однополюсное исполнение, в отличие от отечественных производителей.

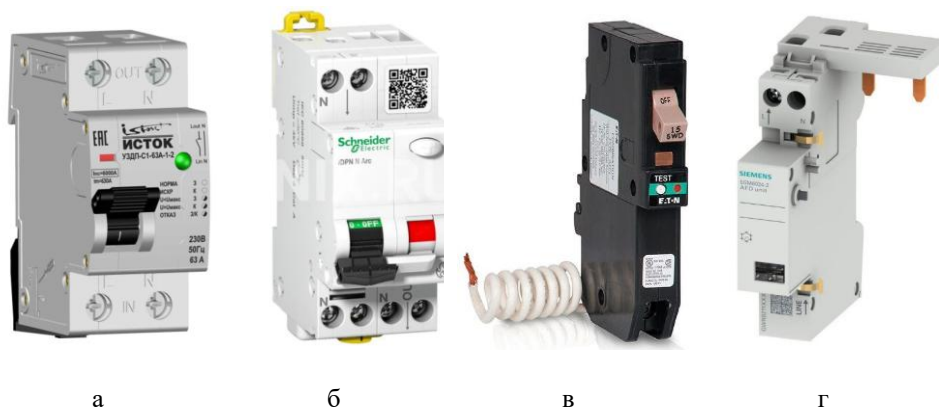


Рис. 4. Виды УЗДП (а – Российская Федерация; б – Французская Республика; в - Соединенные Штаты Америки; г- Федеративная Республика Германия)

Fig. 4. Types of AFDD (a – Russian Federation; b – French Republic; c – United States of America; d – Federal Republic of Germany)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В 2020 г. разработанные Ассоциацией «Росэлектромонтаж» рекомендации по применению УЗДП утверждены приказом¹ в виде Изменений № 4 к Федеральному своду правил СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа» (СП).

В 2024 г. разработанные Ассоциацией «Росэлектромонтаж» обязательные требования по применению УЗДП утверждены приказом² в виде Изменений № 6 к вышеуказанному СП.

На основании Изменений № 6 к СП УЗДП для защиты групповых сетей следует применять в следующих жилых и общественных зданиях:

- дошкольных образовательных и общеобразовательных учреждениях;
- образовательных учреждениях с круглосуточным пребыванием обучающихся;
- спальных корпусах организаций отдыха детей и их оздоровления;
- организациях, предназначенных для осуществления медицинской деятельности, в том числе: диспансерах, поликлиниках, госпиталях, больницах и др.;
- специализированных домах для престарелых и инвалидов неквартирного типа;
- жилых помещениях зданий, предоставляемых для проживания работников предприятия либо учащихся;
- гостиницах с размещением от 1 до 12 человек в номере, а кухни, холл и санузел, вынесенные в отдельные помещения, являются местами общего пользования– хостелах;
- жилых зданиях, высотой более 50 м.

Требования по применению УЗДП приведены в СП 451.1325800.2019 «Здания общественные с применением деревянных конструкций. Правила проектирования» и СП 452.1325800.2019 «Здания жилые многоквартирные с применением деревянных конструкций. Правила проектирования».

По мнению специалистов МЧС России, системное внедрение УЗДП позволит существенно повысить пожарную безопасность электрических сетей и значительно снизить количество пожаров и связанных с ними трагических последствий. УЗДП

¹ Приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30.12.2020 N 919/пр.

² Приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 28.12.2023 г. № 1005/пр.

должны соответствовать требованиям, указанным в нормативных документах³.

Литературный обзор (Literature Review)

В работе [8] рассмотрены признаки появления дугового пробоя в распределительных сетях низкого напряжения, которые позволят вовремя определить и отключить это повреждение. Описана методика и приведены результаты эксперимента по изучению дуговых пробоев и маскировочного эффекта нагрузки. Представлена модель дугового пробоя, реализованная в программном комплексе Matlab/Simulink.

По своей природе дуговое замыкание представляет собой беспорядочное явление с различной временной устойчивостью и переменной способностью воспламенить пожар [9]. В настоящее время не существует требований к минимальному постоянству дуги во время стандартного испытания последовательной дуги, а также нет четких указаний о том, как измерить временную устойчивость дуги и подтвердить, что испытание привело к успешному последовательному дуговому замыканию. Целью работы [9] является усовершенствование стандартов путем предложения простого метода точного определения устойчивости дуги во время испытания на дуговое замыкание. Используя в качестве входных данных только ток дуги и напряжение дуги, можно принять или отклонить стандартный последовательный сигнал дуги на основании измеренного уровня временной устойчивости дуги.

Основной причиной возникновения возгораний и пожаров в электроустановках являются аварийные дуговые замыкания. Высокая температура горения электрической дуги, достигающая порядка 3000°C [10], представляет серьезную пожарную опасность.

Для предотвращения таких аварийных ситуаций в новых устройствах применяется принцип непрерывного мониторинга процессов в контролируемых электрических цепях. Эта система позволяет выявлять сигналы, свидетельствующие о наличии дугового пробоя, будь то параллельный или последовательный. При обнаружении повреждения происходит незамедлительное отключение питания поврежденного участка сети.

В работе [10] описан подробный алгоритм решения задачи распознавания возникновения дуговых пробоев и искровых промежутков в электроустановке. Он основан на общем представлении о коммутационных процессах и вводит ключевое понятие нестационарного коммутационного процесса. Предложенный способ позволяет выделить из суммарных электрических сигналов электроустановки параметры тока нагрузки и напряжения на нагрузке, характеризующие возникновение дугового пробоя. Это дает возможность своевременно идентифицировать наличие повреждения и оперативно обесточить поврежденный участок, предотвращая возникновение пожара.

В работе [11] анализировались оба типа повреждений последовательные и параллельные во временной и частотной областях, а затем сравнивались с невозмущенным током нагрузки. Анализ Фурье показал, что определенные диапазоны частотного спектра могут использоваться как индикаторы дугового замыкания.

Процесс образования электрической дуги в электроустановках низкого напряжения представлен в статье [12]. Описано негативное влияние электрической дуги на безопасность человека и электрооборудования, а также приведена статистика. Рассмотрены группы дуговых пробоев, а также приведены их свойства и причины возникновения. Помимо вышеизложенного представлено описание существующих в настоящее время способов защиты от повреждений, связанных с электроснабжением, и вероятностью их обнаружения при возникновении дугового пробоя. Дано описание изготовленной экспериментальной установки для образования дугового пробоя низкого напряжения, приведены результаты экспериментов.

Рассмотрены международные и российские нормативные документы в статье [13], определяющие порядок применения УЗДП в электроустановках низкого напряжения в жилых и общественных зданиях. Показаны возможные случаи ложных срабатываний УЗДП и способы снижения таких отключений.

В работе [14] приведен анализ действующей нормативной документации и практики применения этих аппаратов в Европе, США и Канаде. Изложены принципы работы УЗДП и требования нормативных документов по проведению испытаний и подтверждению их основных характеристик. Представлены результаты эксперимента по применению этих устройств на реальном объекте.

Некоторые сведения об УЗДП как нового продукта в бытовых энергосистемах в Соединенных Штатах Америки для защиты от условий, которые могут вызвать пожар,

³ ГОСТ ИЕС 62606-2016 «Устройства защиты бытового и аналогичного назначения при дуговом пробое. Общие требования».

представлены в [15]. Так же рассмотрены перспективы УЗДП как развивающейся технологии, которая может найти применение в промышленности, поскольку потенциальные применения станут достаточно хорошо изучены.

Потенциал использования устройств защиты от дуговых пробоев (УЗДП) в Европейских странах широко раскрыт в работе [16]. Практически все крупнейшие производители аппаратов защиты выпускают свои версии УЗДП, что свидетельствует о широком признании данной технологии. Важным вопросом является также идентификация и обеспечение полноценной работы в нормальных условиях некоторых промышленных устройств, внутри которых возникает электрическая дуга, например, сверлильных станков, отрезных станков и т.п. Эти устройства должны выполнять свои функции без ложного отключения аппаратами защиты. Для этого необходимо изучение симметрии сигнала тока по отношению к синусоидальной форме волны. Данная работа предлагает анализ электрических параметров, производимых в результате нормальной работы некоторого вида оборудования (сверлильных станков, фрезерных станков, электрических дисковых резчиков), в котором наличие дуговых пробоев может присутствовать в штатном режиме работы совместно с зародившимся дефектом. В случае нормальной работы форма волны электрического тока симметрична относительно обоих полупериодов сигнала питания. В то время как при возникновении дефекта и дугового пробоя, форма тока становится ассиметричной. Таким образом, анализ симметрии формы тока является ключевым методом для УЗДП, позволяющим отличать нормальные режимы работы с допустимыми дуговыми разрядами от аварийных ситуаций с опасными дуговыми пробоями. Это обеспечивает корректную работу устройств защиты без ложных срабатываний в промышленных условиях.

В работе [17] проведена серия экспериментов с дуговыми замыканиями и сравнительный анализ характеристик работы различных УЗДП. Это важное исследование, которое поможет лучше понять особенности работы УЗДП и их способность предотвращать пожары из-за дуговых замыканий.

Метод обнаружения последовательных дуговых замыканий с приведённой программной схемой и принципами его прикладной аппаратной реализации предложен в работе [18]. Прототип УЗДП на номинальное напряжение 220 В и номинальный ток 40 А был протестирован в соответствии с экспериментальными методами, предусмотренными китайским национальным стандартом. Результаты экспериментов показывают, что предложенный метод обнаружения прост и практичен, и может быть реализован с использованием недорогого микропроцессора. Предлагаемый метод послужит хорошим теоретическим руководством для продвижения исследований и разработок УЗДП.

В Южной Корее предотвращение электрических пожаров с помощью последовательной дуги применяется редко, поскольку не существует национального стандарта для УЗДП, как это описано в статье [19]. Поэтому для предотвращения электрических пожаров Южной Кореи по-прежнему необходимы многочисленные исследования работы УЗДП по надежному обнаружению и анализу дуги. В исследовании [19] был проведен анализ последовательных дуговых сигналов для низковольтных электрических устройств, таких как обогреватели, компьютеры, холодильники и кондиционеры. Фаза обнаруженных сигналов последовательной дуги анализировалась в соответствии с типами нагрузки, и, наконец, был предложен новый алгоритм, основанный на результатах анализа последовательной дуги с фазовым разрешением, для идентификации типов нагрузок.

В патенте [20] представлен способ работы УЗДП, техническим результатом которого является повышение точности определения случаев искрения, снижения количества ложных срабатываний устройства защиты от искрения, увеличение зоны обслуживания, количества подключенных электроприборов, протяженности и разветвленности защищаемой цепи.

Устройство для тестирования УЗДП на последовательный дуговой пробой представлено в статье [21]. Установлено, что различные типы УЗДП способны отключать последовательный дуговой пробой и соответственно повысить безопасность эксплуатации электрических сетей до 0,4 кВ.

В работе [22] предложен метод испытаний на эффективность срабатывания УЗДП на дуговые пробой под определенные условия сети и даны рекомендации по его реализации с целью возможности подбора наиболее оптимального оборудования.

Генератор электрической дуги, который позволяет генерировать электрическую дугу в электроустановках переменного тока, с последующим применением его для диагностики УЗДП приведен в патенте [23].

Одним из ключевых показателей работоспособности УЗДП определена время-токовая характеристика, которая требует расчета предельно допустимого времени отключения при заданном токе дугового замыкания [24].

Целью исследования [25] явилась разработка метода экспериментальных испытаний для проверки правильного функционирования магнитотермических выключателей с функцией защиты от электрической дуги при возникновении дуговых замыканий. Результаты показывают, что предложенный метод адекватно определяет правильные операции и время отключения при использовании различных ограничителей перенапряжения. Предлагаемая система закладывает основу портативной испытательной системы для периодической проверки электрических систем, в которых установлены УЗДП.

В статье [26] сравнивались характеристики трёх биполярных устройств обнаружения дуговых замыканий. Испытания УЗДП должны проводиться для каждой его функции. Тесты каждой функциональности требуют различной схемы, которая должна учитывать достаточное напряжение для питания электронных схем внутри устройств. Устройства УЗДП тестируются отключенными для каждого стандартного моделирования. Для срабатывания защиты специально разработана схема, имитирующая как возникновение электрической дуги последовательно с потребителем для однофазной цепи, дуги параллельно между двухфазными проводниками, так и перенапряжения более 270 В соответствующей обнаружению дуги.

Многочисленность публикаций, посвящённых анализу работы и совершенствованию УЗДП, подтверждает актуальность темы, затронутой авторами в статье.

Материалы и методы (Materials and methods)

Для проверки УЗДП на последовательных дуговых пробоях используется устройство, содержащее генератор электрической дуги [23]. Вышеописанное устройство положительно зарекомендовало себя и позволяет обеспечить безопасную проверку на заявленные характеристики всех типов аппаратов защиты от дугового пробоя и искровых промежутков как отечественных, так и зарубежных производителей.

В процессе создания нового испытательного оборудования для проверки УЗДП, помимо вышеуказанного устройства, было разработано устройство, которое позволяет проверить на заявленные характеристики УЗДП как при последовательных, так и при параллельных дуговых пробоях и искровых промежутках [21]. Данное устройство проверки аппаратов защиты от последовательного и параллельного дуговых пробоев и искровых промежутков помимо источника электрической дуги, генерирующего дугу последовательно включенного в цепь, содержит источник для параллельного дугового пробоя в виде образца кабеля с параллельными проводниками, при протекании тока формируется параллельный дуговой пробой путем создания карбонизированного проводящего пути через изоляцию между двумя проводниками кабеля, ток которого определяют величиной и характером регулируемой нагрузки, возникающий параллельный дуговой пробой запускает секундомер, при этом на исправном аппарате защиты под воздействием параллельного дугового пробоя происходит его срабатывание с отключением измерителя времени и прекращением горения дуги, а секундомер фиксирует время срабатывания аппарата защиты.

Недостатком вышеописанных устройств является то, что в них отсутствует возможность проверки УЗДП от параллельного дугового пробоя и искровых промежутков на землю.

Проверка на срабатывание УЗДП при замыкании на землю является актуальной задачей, так как на сегодняшний день на рынке электрооборудования представлено большое количество этих аппаратов, которые не соответствуют заявленным характеристикам. Для выполнения проверки на срабатывание УЗДП при замыкании на землю на базе АО «Татэлектромонтаж» разработан лабораторный стенд на основании [27]. Лабораторный стенд представляет из себя испытательное оборудование, способное воспроизвести аварийные режимы для достоверного заключения о соответствии и работоспособности аппаратов УЗДП заявленным характеристикам при замыкании на землю.

Исследования в этой области необходимы с целью совершенствования уже имеющихся способов и методов по выявлению некачественных УЗДП.

Проверяемые устройства в условиях лабораторных испытаний позволяют получить информацию по некорректным срабатываниям УЗДП. В дальнейшем эта информация может быть использована производителями УЗДП для выявления брака и

совершенствования алгоритмов работы УЗДП. Потребители в свою очередь получают качественный и надежный УЗДП.

Проверка на соответствие срабатыванию УЗДП возможна только в лабораторных условиях при наличии соответствующего испытательного оборудования с фиксацией времени срабатывания с последующим сопоставлением с нормативными значениями согласно требованиям³.

Проведение лабораторных испытаний решает задачу по проверке УЗДП от параллельных дуговых пробоев на землю, результаты экспериментов будут направлены на повышение надежности и пожарной безопасности электрических сетей и электроустановок.

Разработанное устройство проверки УЗДП позволяет обеспечить безопасную проверку на заявленные характеристики всех типов УЗДП отечественных и зарубежных производителей и реализуется с помощью схемы, представленной на рисунке 5.

Данное устройство (рис. 5) было использовано при разработке лабораторного стенда для проверки серийных образцов УЗДП при реальных параллельных дуговых пробоях на землю.

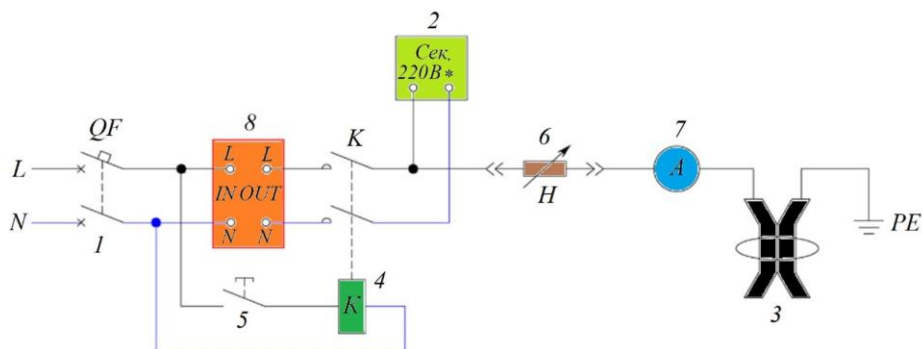


Рис. 5. Схема устройства для проверки УЗДП от параллельного дугового пробоя и искровых промежутков на землю

Fig. 5. Scheme of the device for testing the AFDD from parallel arc breakdown and spark gaps to ground

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Лабораторный стенд для проверки УЗДП от параллельного дугового пробоя и искровых промежутков на землю, разработанный на основании схемы (рис. 5), представлен на рисунке 6.



Рис. 6. Лабораторный стенд для проверки УЗДП от параллельного дугового пробоя и искровых промежутков на землю

Fig. 6. Laboratory stand for testing AFDD from parallel arc breakdown and spark gaps to ground

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Испытательный стенд для проверки на срабатывание УЗДП при параллельном дуговом пробое и искровых промежутках на землю в соответствии со схемой (рис. 5) собран следующим образом:

- подключение УЗДП (8) к сети осуществляется через автоматический выключатель (1);
- катушка управления контактора (4) через кнопку включения (5) подключается на питающий вход УЗДП (8);
- на выходе УЗДП (8) подключены силовые контакты контактора (4);
- на выходе УЗДП (8) присоединены две цепи: первая параллельная содержит секундомер (2); вторая – последовательно соединены регулируемая нагрузка (6), амперметр (7) и образец кабеля с параллельными проводниками (3).

Соединения между элементами выполнены разборными контактами путем свинчивания в соответствии с требованиями нормативных документов.

Испытательный стенд для проверки на срабатывание УЗДП при параллельном дуговом пробое и искровых промежутках на землю в соответствии со схемой (рис. 5) работает в следующем порядке:

1. Одновременно с кнопкой включения (5) срабатывает контактор (4) и запускается секундомер (2).
2. Ток, текущий в цепи, фиксируется амперметром (7).
3. Под воздействием параллельного дугового пробоя на землю, происходит срабатывание исправного УЗДП с одновременным отключением цепи, с последующим прекращением горения дуги.
4. Время срабатывания УЗДП фиксируется секундомером.

Параллельный дуговой пробой на землю является начальным этапом короткого замыкания на землю и сопровождается большими токами. На рисунке 7 представлен момент протекания процесса параллельного дугового пробоя на землю во время испытания на лабораторном стенде (рис. 6).



Рис. 7. Параллельный дуговой пробой на землю на образце кабеля

Fig. 7. Parallel arc breakdown to ground on a cable sample

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Параллельный дуговой пробой на землю в дальнейшем сопровождается выделением большого количества тепла (рис. 7) с последующим переходом в металлическое короткое замыкание, что и наблюдалось при проведении экспериментов. Помимо выгорания изоляционного слоя кабеля, также наблюдалось и выгорание токопроводящей жилы образца кабеля (рис. 8).



Рис. 8. Образец кабеля после завершения параллельного дугового пробоя на землю

Fig. 8. Cable sample after completion of parallel arc fault to ground

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Осциллограммы тока и напряжения, снятые при вышеописанном эксперименте, при параллельном дуговом пробое на землю выглядят несколько иначе, чем при последовательном дуговом пробое, и представлены на рисунке 9.

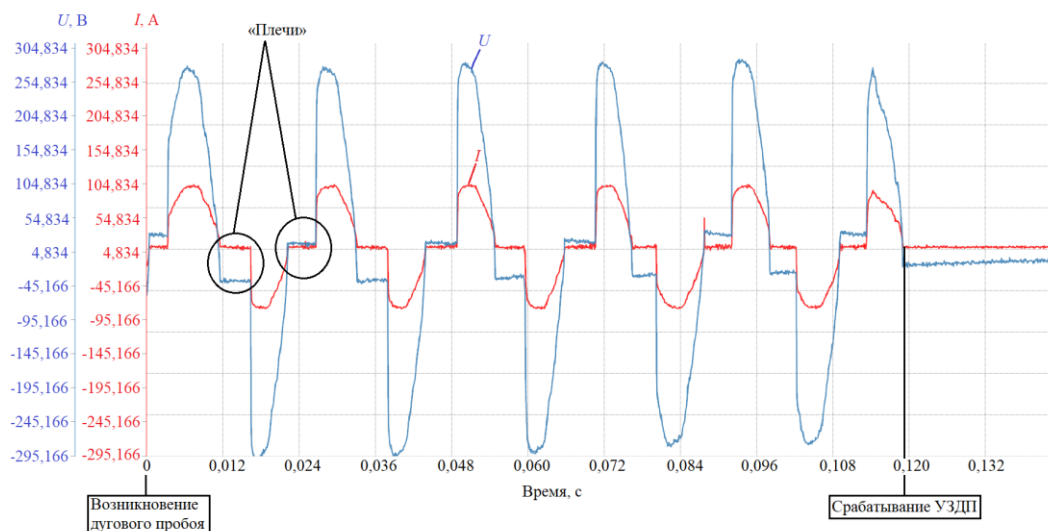


Рис. 9. Осциллограммы тока дуги и напряжения при параллельном дуговом пробое на землю

Fig. 9. Oscillograms of arc current and voltage during parallel arc breakdown to ground

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 9 демонстрируются графики кривых тока и напряжения при параллельном дуговом пробое на землю. На графиках кривых тока и напряжения (рис. 9) можно наблюдать форму с «плечами», являющейся индикатором срабатывания УЗДП.

Результаты (Results)

Применение лабораторного стенда позволяет определить параметры УЗДП и сравнить его с требованиями нормативной документации³ при параллельном дуговом пробое и искровых промежутках на землю. Появилась возможность определения условий срабатывания УЗДП различных производителей при параллельном дуговом пробое и искровых промежутках на землю. На данный лабораторный стенд для проверки УЗДП на параллельный дуговой пробой и искровые промежутки на землю получен патент на полезную модель [27].

Предлагаемый лабораторный стенд позволяет фиксировать фактическое срабатывание УЗДП от параллельного дугового пробоя и искровых промежутков на землю за определенное время при использовании изменяемой нагрузки.

Обсуждение (Discussions)

Дуговые пробои или искровые промежутки в электрооборудовании зданий и сооружений — одна из основных причин пожаров, ежегодно приводящая к гибели и травмированию большого количества людей и значительным материальным потерям.

Исходя из статистики МЧС за 2023 г. подобных пожаров в стране довольно много [1]. Полноценной защитой от пожаров, возникающих из-за дуговых пробоев и искрения в электросети, может быть УЗДП.

Для снижения риска возникновения пожара УЗДП должны выявлять, фиксировать и подавать сигнал при возникновении:

- дугового пробоя в групповой сети на землю;
- параллельного дугового пробоя;
- последовательного дугового пробоя.

Электротехнические характеристики УЗДП должны отвечать требованиям следующих структурных элементов:

- по номинальному току I_n ;
- по номинальному напряжению U_n ;
- по номинальной частоте;
- по номинальным включающей и отключающей способностям I_m ;
- по номинальным включающей и отключающей способностям в одном полюсе I_{m1} ;
- по степени защиты;
- по номинальному условному току короткого замыкания I_{nc} ;

- по номинальному условному току короткого замыкания на одном полюсе Inc1;
- по способу присоединения.

Практически все производители электрооборудования выпускают свою версию УЗДП, что вызывает необходимость в проведении испытаний на адекватность срабатывания для определения соответствия этих устройств установленным требованиям, указанным в нормативной документации³.

Проведённые лабораторные испытания УЗДП при разных параметрах сети на корректность срабатывания при замыкании на землю. Осциллографом зафиксирована форма кривой напряжения и тока при замыкании на землю и время срабатывания УЗДП. Испытуемые УЗДП продемонстрировали способность распознать и отключить замыкание на землю.

Проведение экспериментальных исследований с различными видами нагрузок, одновременно с изменением величины испытательных токов, позволит получить осциллограммы, анализ которых позволит разработать общие критерии для адекватного срабатывания всех УЗДП.

Выводы (Conclusions)

Разработан лабораторный стенд для проведения испытания УЗДП на срабатывания при замыкании на землю. С помощью данного стенда существует возможность проверки УЗДП на адекватность срабатывания при замыкании на землю с последующей сертификацией. Проведенные испытания демонстрируют необходимость разработки обязательных требований к УЗДП для стандартизации их алгоритма работы. Установлено, что УЗДП способен выявить и затем отключить параллельный дуговой пробой на землю, что соответственно повышает безопасность эксплуатации электрических сетей до 0,4 кВ с целью уменьшения пожаров, вызванных нарушением правил устройства и эксплуатации электрооборудования.

Полученные результаты позволяют сделать вывод об эффективности срабатывания различных моделей УЗДП при различных условиях эксплуатации (с различной нагрузкой, в силовых и осветительных сетях) с последующей выработкой необходимых рекомендаций по их совершенствованию.

Литература

1. Гончаренко В.С., Чечетина Т.А., Сибирко В.И. и др. Пожары и пожарная безопасность в 2022 году: информ.- аналитич. сб. Балашиха: ФГБУ ВНИИПО МЧС России. 2023. 80 с.
2. Гордисенко Д.М., Лагозин А.Ю., Рябиков А.И. и др. Новый вид защиты электрических сетей // Пожарное дело. 2021. № 5. С. 50-51. EDN QCRTJV.
3. Грачева Е.И., Наумов О.В., Садыков Р.Р. Некоторые особенности исследования основных показателей надежности низковольтных аппаратов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2016. No 1 (29). С. 105–115.
4. Zhang J., Su G., Chen T., et al. Glowing contact in electrical fires: Experimental investigation and modeling on its heat intensity and thermal hazards // Case Studies in Thermal Engineering. Vol. 45. Art. no. 102880. 2023. doi: 10.1016/j.csite.2023.102880.
5. Soluyanov Y., Tyurin A., Akhmetshin A. Test of Arc Fault Detection Devices for Operation from Spark Gaps and Arc Fault in an Electric Circuit of 0.4 kV // 2023 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2023. pp. 374-378. doi: 10.1109/UralCon59258.2023.10291069.
6. Королёв И.В., Кондратьев О.Е., Валуев П.В., и др. Анализ целесообразности применения устройств обнаружения дугового пробоя для комплексной защиты от пожаров, вызванных неисправностями электрооборудования // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. № 2(47). С. 128–131.
7. Грачева Е.И., Сафин А.Р., Садыков Р.Р. Исследование и оценка функциональных параметров низковольтных аппаратов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20, № 5-6. С. 13-21. EDN XWBLWN.
8. Рашевская М.А., Гудожников А.С., Куликов А.И., и др. Определение характерных признаков дугового пробоя в распределительных сетях низкого напряжения // Промышленная энергетика. 2022. № 8. С. 12-21. doi: 10.34831/EP.2022.33.78.002. EDN PJXMLP.
9. Vasile C., D'Orchymont V., Meunier-Carns J., et al. 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.
10. Монаков В.К., Кудрявцев Д.Ю., Козырев А.А. Принцип работы устройства защиты электроустановок от дуговых замыканий // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая политика. 2014. No 1. С. 28-30.

11. Müller P., Tenbohlen S., Maier R., et al. Characteristics of Series and Parallel Low Current Arc Faults in the Time and Frequency Domain // 2010 Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. 2010. pp. 1-7.
12. Дубинин Д.В., Кутейников П.Д., Рашевская М.А. Изучение характеристик электрической дуги низкого напряжения // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2023. № 1(357). С. 34-38. doi: 10.33979/2073-7408-2023-357-1-34-38. EDN BDHYRG.
13. Харламенков А.С. Целесообразность применения устройств защиты от дугового пробоя // Пожаровзрывобезопасность. 2021. Т. 30, № 2. С. 117-122. EDN ZLMDVI.
14. Пехотиков В.А., Смелков Г.И., Рябиков А.И. и др. Перспективы и проблемы применения устройств защиты от дугового пробоя // Безопасность труда в промышленности. 2019. № 11. С. 18-23. doi: 10.24000/0409-2961-2019-11-18-23. EDN XGBSUO.
15. Gregory G.D., Scott G.W. The arc-fault circuit interrupter, an emerging product // 1998 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference Conference Record. Papers Presented at the 1998 Annual Meeting (Cat. No.98CH36202). 1998. doi: 10.1109/ICPS.1998.692533.
16. Hnatiuc B., Turcu F., Hnatiuc M., et al. Detection of electric arc faults by Arc Fault Detection Devices // EPE 2022 - Proceedings of the 2022 12th International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering. 2022. pp. 239–244. doi: 10.1109/EPE56121.2022.9959773.
17. Ra W., Kong H. Comparison Study of Operation Characteristics of AFCI Products // International Journal of Membrane Science and Technology. 2023. Vol. 10. No. 1. pp. 201-208. doi: 10.15379/ijmst.v10i1.1446.
18. Lu Q., Ye Z., Zhang Y., et al. Analysis of the Effects of Arc Volt–Ampere Characteristics on Different Loads and Detection Methods of Series Arc Faults // Energies. Vol. 12. Iss. 2. 2019. doi: 10.3390/en12020323.
19. Ji H.-K., Kim S.-W., Kil G.-S. Phase Analysis of Series Arc Signals for Low-Voltage Electrical Devices. Energies. Vol. 13. Iss 20. 2020. doi: 10.3390/en13205481.
20. Патент № 2660285 C1 Российская Федерация, МПК G01R 31/08, G01R 15/14, H02H 7/26. Устройство защиты от искрения и способ его работы: № 2017135565: заявл. 05.10.2017: опубл. 05.07.2018 / А. С. Мкртумов, А. Н. Немцов, Ф. Н. Немцов. EDN IOHXTI.
21. Ерашова Ю.Н., Ившин И.В., Тюрин А.Н., и др. Испытания устройства защиты от дугового пробоя и искровых промежутков на срабатывание // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, № 3. С. 168-180.
22. Королев И.В., Валуев П.В., Бурдюков Д.А. Моделирование срабатывания УЗДП в электрических сетях 0,4 кВ // Электроэнергия. Передача и распределение. 2019. № 6(57). С. 124-127. EDN FOGLJW.
23. Патент на полезную модель № 199462 U1 Российская Федерация, МПК H02H 7/00, G01R 31/12, G01R 31/08. Генератор электрической дуги: № 2020116974: заявл. 22.05.2020: опубл. 02.09.2020 / А. Н. Тюрин, Ю. И. Солуянов, М. И. Шмуклер, И. В. Ившин; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет». EDN XZOSJX.
24. Монаков В.К., Кудрявцев Д.Ю., Пешкун В.А. Защита от дугового замыкания. Время-токовая характеристика устройства // Энергобезопасность и энергосбережение. 2016. № 6. С. 5-8. doi: 10.18635/2071-2219-2016-6-5-8. EDN XENJZZ.
25. Bucci G., Ciancetta F., Fioravanti A., et al. Testing System for the On-Site Checking of Magneto-Thermal Switches with Arc Fault Detection // Energies. 2020. Vol. 13. Iss. 18. doi: 10.3390/en13184652.
26. Hnatiuc B., Dordescu M. Tests de laboratoire pour les dispositifs AFDD // Journal International de Technologie, de l'Innovation, de la Physique, de l'Energie et de l'Environnement. 2019. doi: ff10.18145/jitipee.v5i2.218.
27. Патент на полезную модель № 223814 U1 Российская Федерация, МПК G01R 31/28. Устройство для проверки аппаратов защиты от параллельного дугового пробоя и искровых промежутков на землю: № 2023131575: заявл. 01.12.2023: опубл. 05.03.2024 / И. В. Ившин, Ю. И. Солуянов, А. Н. Тюрин [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет». EDN KDACAB.

Авторы публикации

Тюрин Александр Николаевич – канд. техн. наук, главный технолог, АО «Татэлектромонтаж». Email: turinal@rambler.ru.

Солуянов Юрий Иванович – д-р техн. наук, профессор, почетный профессор Казанского государственного энергетического университета, президент Ассоциации

«Росэлектромонтаж», председатель совета директоров АО «Татэлектромонтаж», председатель технического комитета по стандартизации ТК 337 «Электроустановки зданий», председатель комитета Российского Союза Строителей по энергоресурсосбережению, энергообеспечению предприятий и безопасности зданий и сооружений. Email: info@roselmon.su.

Ахметшин Азат Ринатович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергетическое машиностроение» Казанского государственного энергетического университета. Email: ahmetshin.ar@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4424-7761>.

References

1. Goncharenko VS, Chechetina TA, Sibirko VI, et al. *Fires and fire safety in 2022: information and analytical collection*. Balashikha: FGBU VNIPO EMERCOM of Russia. 2023. (In Russ).
2. Gordienko DM, Lagozin AYU, Ryabikov AI, et al. New type of electrical network protection. *Fire fighting*. 2021;5:50-51. (In Russ).
3. Gracheva EI, Naumov OV, Sadykov RR. Some features of the study of the main reliability indicators of low-voltage devices. *KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN*. 2016;29(1):105–115. (In Russ).
4. Zhang J, Su G, Chen T, et al. Glowing contact in electrical fires: Experimental investigation and modeling on its heat intensity and thermal hazards. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2023;45:102880. doi: 10.1016/j.csite.2023.102880.
5. Soluyanov Y, Tyurin A, Akhmetshin A. Test of Arc Fault Detection Devices for Operation from Spark Gaps and Arc Fault in an Electric Circuit of 0.4 kV. *2023 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. 2023;374-378. doi: 10.1109/UralCon59258.2023.10291069.
6. Korolev IV, Kondratyev OE, Valuev PV, et al. Analysis of the feasibility of using arc fault detection devices for comprehensive protection against fires caused by electrical equipment malfunctions. *Electric Power. Transmission and Distribution*. 2018; 47(2):128–131. (In Russ).
7. Gracheva EI, Safin AR, Sadykov RR. Research and evaluation of functional parameters of low-voltage devices. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20(5–6):13–21. (In Russ).
8. Rashevskaya MA, Gudozhnikov AS, Kulikov AI, et al. Determination of characteristic signs of arc fault in low-voltage distribution networks. *Industrial Power Engineering*. 2022;8:12-21. doi: 10.34831/EP.2022.33.78.002. (In Russ).
9. Vasile C, D'Orchymont V, Meunier-Carns J, et al. 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.
10. Monakov VK, Kudryavtsev DYU, Kozyrev AA. Operating principle of the device for protecting electrical installations from arc faults. *ELECTRO. Electrical engineering, electric power industry, electrical engineering policy*. 2014;1:28-30. (In Russ).
11. Müller P, Tenbohlen S, Maier R, et al. Characteristics of Series and Parallel Low Current Arc Faults in the Time and Frequency Domain. *2010 Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*. 2010;1-7. doi: 10.1109/HOLM.2010.5619539.
12. Dubinin DV, Kuteinikov PD, Rashevskaya MA. Study of characteristics of low voltage electric arc. *Fundamental and applied problems of engineering and technology*. 2023;357(1):34-38. doi: 10.33979/2073-7408-2023-357-1-34-38. (In Russ).
13. Kharlamenkov AS. Feasibility of using arc flashover protection devices. *Fire and explosion safety*. 2021;30(2):117-122. (In Russ).
14. Pekhotikov VA, Smelkov GI, Ryabikov AI, et al. Prospects and problems of using arc flashover protection devices. *Occupational safety in industry*. 2019;11:18-23. doi: 10.24000/0409-2961-2019-11-18-23. (In Russ).
15. Gregory GD, Scott GW. The arc-fault circuit interrupter, an emerging product. *1998 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference Conference Record. Papers Presented at the 1998 Annual Meeting (Cat. No.98CH36202)*. 1998. doi: 10.1109/ICPS.1998.692533.
16. Hnatiuc B, Turcu F, Hnatiuc M, et al. Detection of electric arc faults by Arc Fault Detection Devices. *EPE 2022 - Proceedings of the 2022 12th International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering*. 2022;239–244. doi: 10.1109/EPE56121.2022.9959773.
17. Ra W, Kong H. Comparison Study of Operation Characteristics of AFCI Products. *International Journal of Membrane Science and Technology*. 2023;1(1):201-208. doi: 10.15379/ijmst.v10i1.1446.
18. Lu Q, Ye Z, Zhang Y, et al. Analysis of the Effects of Arc Volt–Ampere Characteristics on Different Loads and Detection Methods of Series Arc Faults. *Energies*. 2019;12(2). doi: 10.3390/en12020323.

19. Ji H-K, Kim S-W, Kil G-S. Phase Analysis of Series Arc Signals for Low-Voltage Electrical Devices. *Energies*.2020;13(20). doi: 10.3390/en13205481.
20. Patent No. 2660285 C1 Russian Federation, IPC G01R 31/08, G01R 15/14, H02H 7/26. Spark protection device and its operating method: No. 2017135565: declared 05.10.2017: published 05.07.2018 / A. S. Mkrtumov, A. N. Nemtsov, F. N. Nemtsov. (In Russ).
21. Erashova YuN, Ivshin IV, Tyurin AN, et al. Tests of arc flash and spark gap protection device for operation. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(3):168-180. doi: 10.30724/1998-9903-2021-23-3-168-180. (In Russ).
22. Korolev IV, Valuev PV, Burdyukov DA. Modeling the response of the UZDP in 0.4 kV electrical networks. *Electric Power. Transmission and Distribution*. 2019;57(6):124-127. (In Russ).
23. Patent for utility model No. 199462 U1 Russian Federation, IPC H02H 7/00, G01R 31/12, G01R 31/08. Electric arc generator: No. 2020116974: declared. 22.05.2020: published. 02.09.2020 / A. N. Tyurin, Yu. I. Soluyanov, M. I. Shmukler, I. V. Ivshin; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kazan State Power Engineering University". (In Russ).
24. Monakov VK, Kudryavtsev DYU, Peshkun VA. Arc fault protection. Time-current characteristic of the device. *Energy safety and energy saving*. 2016;6:5-8. doi: 10.18635/2071-2219-2016-6-5-8. (In Russ).
25. Bucci G, Ciancetta F, Fioravanti A, et al. Testing System for the On-Site Checking of Magneto-Thermal Switches with Arc Fault Detection. *Energies*. 2020;13(18). doi: 10.3390/en13184652.
26. Hnatiuc B, Dordescu M. Tests de laboratoire pour les dispositifs AFDD. *Journal International de Technologie, de l'Innovation, de la Physique, de l'Energie et de l'Environnement*. 2019. doi: ff10.18145/jitipee.v5i2.218.
27. Patent for utility model No. 223814 U1 Russian Federation, IPC G01R 31/28. Device for testing protection devices against parallel arc breakdown and spark gaps to earth: No. 2023131575: declared 01.12.2023: published 05.03.2024 / I. V. Ivshin, Yu. I. Soluyanov, A. N. Tyurin [et al.]; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kazan State Power Engineering University". (In Russ).

Authors of the publication

Alexander N. Tyurin – "Tatelektromontazh" JSC, Kazan, Russia. Email: turinal@rambler.ru.

Yuri I. Soluyanov – "Roselectromontazh" Association, Moscow, Russia. Email: info@roselmon.su.

Azat R. Akhmetshin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: ahmetshin.ar@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4424-7761>.

Шифр научной специальности: 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды; 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Получено 01.07.2024 г.

Отредактировано 14.07.2024 г.

Принято 30.07.2024 г.