

---

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ**

---

**УДК 621.311****В.Ю. Вуколов<sup>1</sup>, А.А. Петров<sup>2</sup>,  
Д.М. Горшкова<sup>1</sup>, Е.В. Симонова<sup>1</sup>****ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ  
МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ  
ОТ ДУГОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ ЯЧЕЕК СЕКЦИИ  
НАПРЯЖЕНИЕМ 0,4-35 КВ**

<sup>1</sup> Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева

<sup>2</sup> АО «Научно-исследовательское предприятие общего машиностроения»

Рассмотрены вопросы повышения надежности электроснабжения на напряжении 0,4-35 кВ путем разработки быстродействующей и чувствительной микропроцессорной дуговой защиты. Принцип действия датчиков дугового замыкания основан либо на измерении возникающих термических или ударных воздействий, либо на выявлении одного из свойств оптического излучения, выделяемого вспышкой электрической дуги. При определении места возникновения дугового замыкания в пределах распределительного устройства подстанции целесообразно использовать дуговую защиту с волоконно-оптическим датчиком. Различают распределенные и централизованные дуговые защиты. Основным преимуществом распределенной дуговой защиты является существенное упрощение монтажа и послеаварийного обслуживания. Для реализации функции контроля тока требуется наличие в терминале дуговой защиты аналого-цифрового преобразователя, что существенно увеличивает стоимость устройства. Централизованные дуговые защиты являются более дешевым и экономически эффективным вариантом.

**Ключевые слова:** дуговая защита, микропроцессорная релейная защита, надежность.

**I. Введение**

Распределительные устройства (РУ) 0,4-35 кВ, составляющие основу формирования распределительных электрических сетей, устанавливаются, главным образом, в закрытых помещениях (ЗРУ) или изолированных камерах, т.е., являются закрытыми электроустановками. Особенность кон-

струкции РУ данных напряжений заключается в том, что токоведущие части в них имеют воздушную изоляцию и малые габариты, поэтому при возникновении дугового короткого замыкания (ДЗ) подвергаются значительным термическим и динамическим воздействиям. Горение электрической дуги через интервал времени 10 мс после возникновения ДЗ характеризуется максимумом ударной волны (разрушение электрооборудования), через 100 мс начинается плавление концевой заделки кабелей, через 150-200 мс происходит плавление меди и плавление стали. Помимо материальных потерь, возможна серьезная угроза здоровью и жизни персонала, обслуживающего ячейку.

Данные факторы определяют необходимость разработки быстродействующей и чувствительной микропроцессорной дуговой защиты (ДгЗ), позволяющей надежно определять факт и место возникновения ДЗ в пределах РУ подстанций и обеспечить селективное отключение поврежденного участка сети за счет согласования с подстанционными защитами, выполненными на ином принципе.

## II. Регистрация дуговых замыканий

Отличительная особенность устройств ДгЗ – чувствительные измерительные органы, датчики дугового замыкания, предназначенные для фиксации появления электрической дуги. Принцип действия датчиков основан либо на измерении возникающих термических или ударных воздействий, либо на выявлении одного из свойств оптического излучения, выделяемого вспышкой электрической дуги [1]:

- плотность мощности оптического излучения может достигать до 10 кВт/м<sup>2</sup>;
  - спектр оптического излучения индивидуален и характеризуется сложной формой (большая его часть сосредоточена в диапазоне длин волн от 300 до 800 нм);
  - зависимость амплитуды мощности от времени имеет периодический характер с периодом  $T = 0,01$  с при частоте напряжения сети 50 Гц (амплитуда при этом может изменяться в широких пределах).
- Выделяют следующие виды датчиков фиксации ДЗ:
- 1) температурные (реагируют на повышение температуры);
  - 2) антенные (контролируемый параметр – степень ионизации);
  - 3) клапанного типа (в качестве датчика используются клапаны с путевыми выключателями, реагирующие на изменение давления внутри камеры вследствие горения дуги);
  - 4) фототиристорные (ФТД – фиксирует световую вспышку электрической дуги);
  - 5) волоконно-оптические (ВОД – также реагирует на свечение дуги).

По способу измерения контролируемого параметра температурные датчики подразделяются на контактные и дистанционные. Применение дистанционных затруднено из-за необходимости обеспечения точного расположения датчика по отношению к столбу дуги, положение которого заранее неизвестно [2]. Контактные датчики имеют ограниченный диапазон измерения температуры и обладают инерционностью, поэтому возможности их применения также ограничены.

Антенные датчики, определяющие плотность заряженных частиц при возникновении дуги [3, 4] для обеспечения быстродействия и чувствительности ДгЗ, так же, как и температурные, необходимо устанавливать вблизи места КЗ (расстояние до столба дуги не более 10 см). Такую систему ДгЗ возможно реализовать лишь при использовании большого количества датчиков, расположенных вблизи ошиновки РУ. При этом к датчикам предъявляются повышенные требования по термической стойкости, что делает такую ДгЗ дорогостоящей и малоэффективной.

ДгЗ, построенная на датчиках клапанного типа, тоже имеет существенные недостатки:

- срабатывание клапанного датчика происходит при возникновении избыточного давления, достигаемого при длительном горении дуги в течение 100-500 мс, что может привести к частичному повреждению оборудования и загрязнению ячейки продуктами горения;
- для корректной работы датчиков клапанного типа необходимо обеспечить герметичность камеры, в которой находится датчик, что представляет дополнительную сложность производства комплектных и, особенно, стационарных РУ;
- несрабатывание датчика при малых токах коротких замыканий (КЗ) из-за недостаточного давления (опыт эксплуатации такого оборудования в качестве пороговой границы определяет значение тока ниже 3,5кА).

По этим причинам в настоящее время датчики клапанного типа не используются. Широкое распространение получила ДгЗ с датчиками, регистрирующими изменение световой вспышки в защищаемом отсеке (ФТД и ВОД).

Основным компонентом ФТД является фототиристор либо иной полупроводниковый фотоэлемент (фотодиод, фоторезистор, фототранзистор). Такой датчик устанавливается непосредственно в защищаемый отсек РУ, и при возникновении ДЗ в зоне чувствительности датчика через фотоэлемент начинает протекать ток. Электрическая природа ФТД позволяет увеличить быстродействие ДгЗ, поскольку в устройстве защиты не требуется преобразование светового сигнала в электрический. Данный тип

датчиков имеет относительно небольшой угол «захвата» (в районе  $60^\circ$ ), что делает его применение ограниченным из-за возможности затемнения и, следовательно, необходимости применения большего количества данного типа датчиков в защищаемом отсеке. Кроме того, электронные компоненты ФТД располагаются непосредственно в защищаемом отсеке, что делает их подверженными электромагнитным воздействиям. Указанные недостатки приводят к снижению надежности ДгЗ, построенных с использованием ФТД, что на практике может приводить к ложному срабатыванию защиты и отключению неповрежденных присоединений.

Для повышения надежности ДгЗ целесообразно использовать ВОД, также имеющие оптический принцип действия. Их отличительная особенность заключается в том, что непосредственно в защищаемый отсек устанавливается собирающий пассивный элемент датчика, не подверженный электромагнитным воздействиям, сигнал от которого передается по волоконно-оптическому кабелю к фотоприемнику, вынесенному за пределы РУ.

Устройства ДгЗ, использующие для регистрации электрической дуги ВОД, имеют целый ряд преимуществ:

- высокое быстродействие;
- помехозащищенность;
- ВОД не требуют питания;
- диэлектрическая природа волоконно-оптического кабеля;
- невысокая стоимость.

По принципу фиксации свечения дуги различают два типа ВОД: точечные и линейные. Линейные датчики представляют собой кабель, способный захватывать излучение светового потока по участку своей длины, что позволяет использовать его в нескольких ячейках одновременно. В то же время такая особенность снижает точность определения места ДЗ. Точечные датчики улавливают свет своей торцевой поверхностью, угол захвата при этом может быть более  $180^\circ$ . Они обладают повышенной чувствительностью, что позволяет использовать минимум датчиков в ячейке, однако существует риск затенения.

Недостаток устройств ДгЗ, использующих ВОД – необходимость преобразования светового потока с выхода датчика в дискретный сигнал для дальнейшего анализа микропроцессорным терминалом ДгЗ. В качестве таких преобразователей используются либо регистраторы ДЗ, объединяющие сигналы с нескольких датчиков и преобразующие их в электрическую форму, либо специальные входные контакты дискретных плат терминала. Преобразование сигнала занимает около 15 мс, что отрицательно сказывается на быстродействии защиты. Вторым существенным недостатком ВОД является то, что соединительный волоконно-оптический кабель легко по-

вредить при монтаже, а именно – «сломать волокно» в результате его изгиба при прокладке в ячейках.

Несмотря на указанные недостатки, именно применение ВОД совместно с микропроцессорными терминалами ДгЗ позволяет обеспечить максимально эффективное выполнение требований к релейной защите (РЗ).

### III. Варианты исполнения и требования к устройствам защиты от дуговых замыканий

Различают два варианта построения ДгЗ – распределенная и централизованная дуговая защита. Распределенная ДгЗ представляет собой совокупность отдельных устройств (блоков) ДгЗ, устанавливаемых в каждом защищаемом отсеке или ячейке РУ. Селективность такой защиты обеспечивается независимой работой отдельных блоков на отключение выключателя со стороны источника питания для защищаемого элемента. К одному блоку может быть подключено до 3-4 датчиков, расположенных в изолированных отсеках ячейки РУ. Пуск каждого из блоков распределенной ДгЗ происходит при появлении сигнала от датчика ДЗ защищаемого элемента и превышении амплитуды тока защищаемого присоединения значения уставки. По причине отсутствия в большинстве таких защит современных производителей собственных измерительных органов (уменьшение габаритных размеров и снижение стоимости защит), пуск по току реализуется по сигналу срабатывания пусковых органов максимальной токовой защиты (МТЗ) защищаемой ячейки. Пример построения распределенной ДгЗ с использованием ВОД представлен на рис. 1.

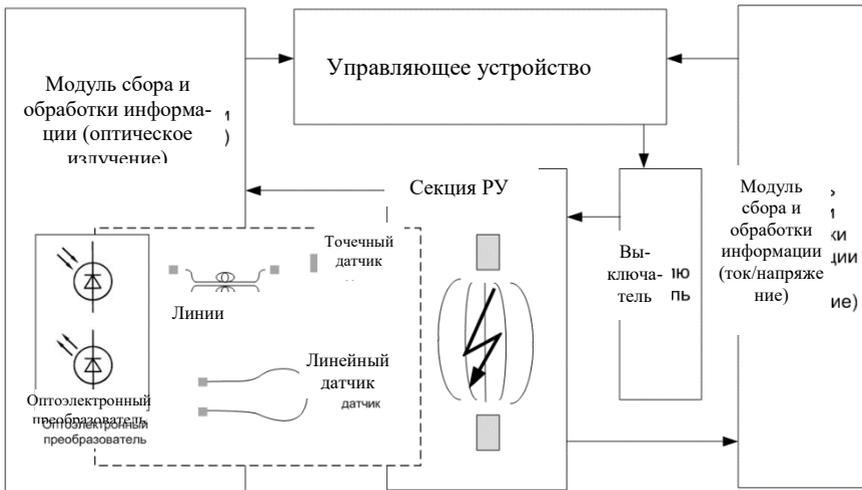


Рис. 1. Принципиальная схема блока распределенной ДгЗ

Централизованная ДгЗ состоит из одного микропроцессорного терминала РЗ, на дискретные входы которого приходит информация с датчиков ДЗ всех отсеков и ячеек защищаемой секции шин. Кроме того, в терминале имеется, как правило, отдельная плата аналоговых входов, к которой подведены сигналы с трансформаторов тока ввода и трансформатора напряжения защищаемой секции. Пример реализации централизованной ДгЗ секции шин напряжением 10 кВ представлен на рис. 2.

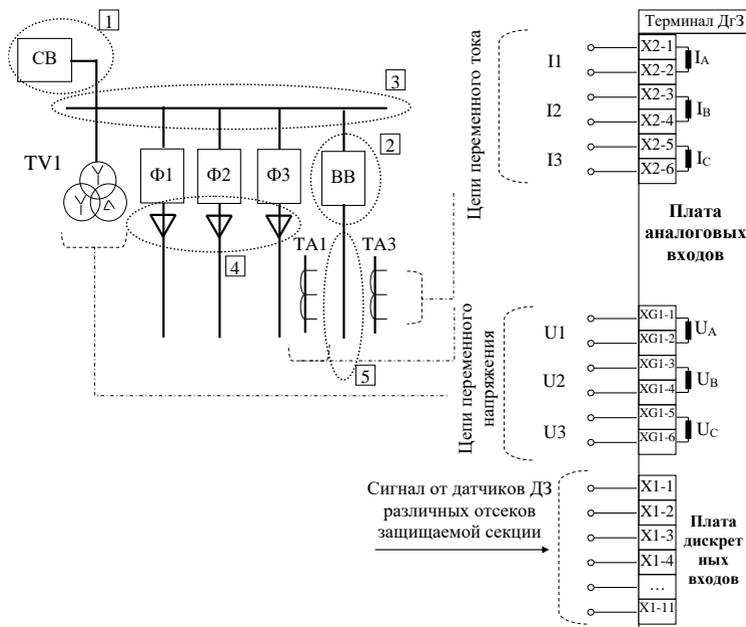


Рис. 2. Принципиальная схема централизованной ДгЗ:

зона секционного выключателя (1); зона вводного выключателя (2); зона сборных шин (3); кабельный отсек отходящих фидеров (4); зона ввода (5)

Для распределенного варианта выполнения ДгЗ отмечают следующие преимущества:

- 1) повышение надежности (при выходе из строя устройства или потере его питания нарушается работа ДгЗ только одной ячейки);
- 2) упрощение монтажа (нет потребности в монтаже вне пределов ячейки – не требуется установка шкафов ДгЗ, кабельных лотков и др.);

- 3) удобство обслуживания (при обслуживании или послеаварийном восстановлении, например, после ДЗ в кабельном отсеке, нет необходимости выводить из работы секцию РУ);
- 4) простота модернизации ДгЗ (при расширении РУ или задействовании резервных присоединений не требуется переконфигурация защиты всей секции, параметрирование вновь устанавливаемого терминала может быть выполнено путем копирования уставок аналогичной ячейки).

В то же время при правильном выполнении централизованного варианта ДгЗ ряд указанных преимуществ теряет актуальность. Так, значительно повысить надежность централизованного исполнения защиты можно путем установки двух взаиморезервирующих терминалов ДгЗ с одинаковым функциональным исполнением. Монтаж таких устройств на напряжение 6-35 кВ осуществляется в релейном отсеке РУ и, как правило, не требует установки отдельных шкафов защиты. Кроме того, современные микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики (РЗА), поддерживающие стандарт МЭК-61850, имеют возможность дистанционного изменения уставок и конфигурирования логических схем. Поэтому основным преимуществом распределенного исполнения ДгЗ остается упрощение монтажа и послеаварийного обслуживания устройства. В то же время распределенный вариант ДгЗ имеет ряд критических недостатков. Для их выявления рассмотрим действующие требования ОАО «Россети», установленные для микропроцессорных устройств РЗА [5]. Согласно этому документу, во всех цифровых терминалах ДгЗ должны быть реализованы следующие функции и характеристики:

- наличие контроля тока;
- запрет автоматического повторного включения (АПВ) выключателя ввода и автоматического включения резерва (АВР) секционного выключателя;

Количество входов для датчиков дуговой защиты – не менее трех: вспышка в отсеке шин, вспышка в отсеке выключателя или выкатной тележки и вспышка в кабельном отсеке.

Для реализации функции контроля тока требуется наличие в терминале ДгЗ аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Поэтому пуск дуговой защиты по сигналу от МТЗ, реализованный во всех существующих распределенных устройствах ДгЗ, не соответствует предъявляемым требованиям к микропроцессорным РЗА. Для устранения этого несоответствия потребуется либо оснащение каждого блока ДгЗ платой АЦП (существенно увеличивает стоимость каждого устройства), либо установка дополнительного блока защиты, осуществляющего контроль параметров режима защищаемой секции РУ (значительно возрастает стоимость за счет допол-

нительных соединительных кабелей и появления нового устройства). Поэтому, наиболее рациональным и экономически эффективным вариантом является организация централизованной микропроцессорной ДгЗ ячеек секции шин.

#### IV. Пример исполнения централизованной микропроцессорной дуговой защиты ячеек секции шин 6 (10) кВ

Для выбора универсального исполнения устройства ДгЗ ячеек секции шин необходимо рассмотреть варианты исполнения защищаемого РУ (рис. 3).

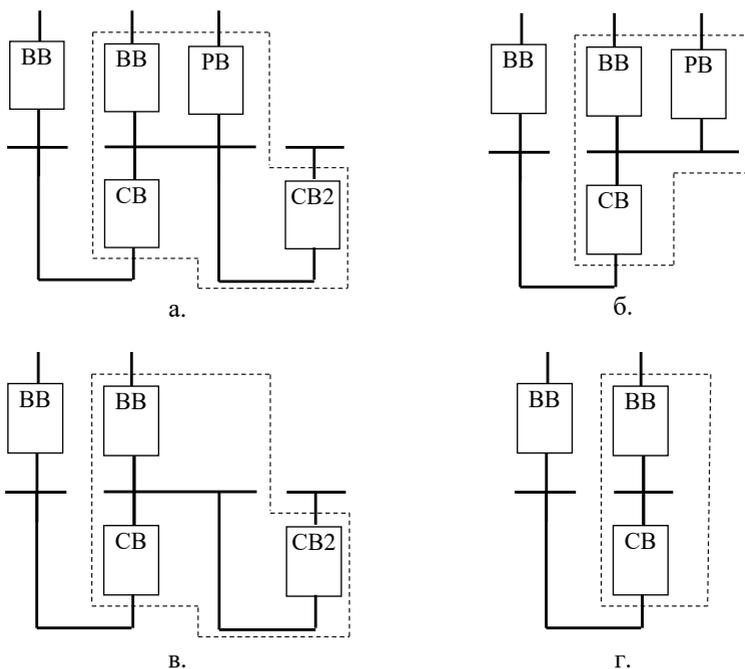


Рис. 3. Варианты исполнения защищаемого РУ:

- схема с резервным вводом и вторым секционным выключателем (а);
- схема без второго секционного выключателя (б);
- схема без резервного ввода (в);
- схема без резервного ввода и второго секционного выключателя (г)

Как видно из представленных на рис. 3 вариантов компоновки РУ, в наиболее общем случае в зоне защиты устройства ДгЗ предусматривается наличие ячеек основного и резервного ввода, двух секционных выключателей и ячеек отходящих присоединений. Поэтому для формирования сиг-

налов селективного отключения выключателей при ДЗ отсеки ячеек РУ целесообразно объединить в следующие зоны:

- зона кабельного отсека ячеек отходящих присоединений;
- зона сборных шин;
- зона ввода;
- зона выключателя ввода;
- зона секционного выключателя;
- зона ввода секционного выключателя;
- зона второго секционного выключателя;
- зона ввода второго секционного выключателя;
- зона выключателя резервного ввода;
- зона ввода выключателя резервного ввода.

В каждой ячейке устанавливается не менее трех ВОД, световые сигналы от которых обрабатываются и преобразуются в электрические в специальных устройствах, называемых регистраторами. Выделение зон защиты на основе отдельных ячеек или отсеков производится путем объединения выходов регистраторов от соответствующих датчиков по схеме монтажное «ИЛИ» и их последующем подключением на дискретные входы терминала ДгЗ, назначенные соответствующим сигналам.

Формирование логической команды возникновения ДЗ в определенной зоне защиты для исключения ложных срабатываний, вызванных неисправностью датчиков, происходит при одновременном наличии на входах терминала ДгЗ сигнала от регистратора и сигнала пуска защит. Поэтому общее количество дискретных входов терминала должно в два раза превышать число выделенных зон защиты от дуговых замыканий. Кроме того, необходимо предусмотреть контроль трех фазных токов вводного присоединения, а также контроль фазных или линейных напряжений защищаемой секции шин (необходимо для формирования сигналов пуска защит вводного и защит секционного выключателя). Для этого в терминале предусматривается по три аналоговых входа тока и напряжения, дополненные модулем АЦП.

При наличии в устройстве ДгЗ поддержки стандарта МЭК-61850, количество дискретных входов терминала может быть существенно сокращено за счет передачи сигналов срабатывания защит по интерфейсам коммуникаций. Функционально-логическая схема ДгЗ обеспечивает формирование выходных команд селективного отключения поврежденных ячеек, резервирование отказа выключателей, запрета АПВ или АВР и неисправности устройства, назначаемые на выходные реле терминала.

## В. Выводы

Применение микропроцессорных устройств дуговой защиты позволяет обеспечить быстрое и селективное отключение поврежденных ячеек секции шин напряжением 6-35 кВ. Надежность и чувствительность дуговой защиты во многом определяется характеристиками датчиков, устанавливаемых в зоне защиты для фиксации появления электрической дуги. Различают распределенные и централизованные дуговые защиты. Последние являются более дешевыми и эффективными.

Рекомендуется применять централизованную микропроцессорную дуговую защиту с поддержкой стандарта МЭК-61850, выполненную с использованием волоконно-оптических датчиков.

© Вуколов В.Ю., 2019

© Петров А.А., 2019

© Горшкова Д.М., 2019

© Симонова Е.В., 2019

## Библиографический список

- [1] Fiber optic sensor systems for arc flash detection, Avago Technologies, 2014. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.avagotech.com/docs/AV02-4503EN> (дата обращения 11.10.2019).
- [2] Нагай В.И. Релейная защита ответственных подстанций электрических сетей. М.: Энергоатомиздат, 2002. – 302 с.
- [3] Нагай В.И. Быстрдействующие дуговые защиты КРУ. Современное состояние и пути совершенствования // Новости электротехники. 2003. № 5 (23).
- [4] Гуревич В.И. Принцип построения дуговой защиты распределительных устройств 6-10 кВ // Энергетика и электрификация. 1992. № 3. С. 47-49.
- [5] Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА. СТО 56947007-29.120.70.241-2017. Утв. и введ. в действ. приказом ПАО «ФСК ЕЭС» от 28.02.2017 № 82.

**V.Yu. Vukolov<sup>1</sup>, A.A. Petrov<sup>2</sup>,  
D.M. Gorshkova<sup>1</sup>, E.V. Simonova<sup>1</sup>**

## **PECULIARITIES OF IMPLEMENTATION OF MICROPROCESSOR RELAY PROTECTION AGAINST ARC FAULT OF MODULE OF SECTION WITH VOLTAGE 0,4-35 kV**

<sup>1</sup> Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,  
Nizhny Novgorod, Russia

<sup>2</sup> Scientific and Research Company of General Machinery (NIPOM JSC),  
Nizhniy Novgorod, Russia

**Abstract.** The issues of increasing the reliability of power supply at a voltage of 0,4-35 kV by developing a high-speed and sensitive microprocessor arc protection are considered. The principle of operation of arc sensors is based either on the measurement of thermal or shock effects arising, or on the identification of one of the properties of optical radiation emitted by the flash of an electric arc. When determining the place of occurrence of an arc fault within the substation switchgear, it is advisable to use an arc protection with a fiber-optic sensor. There are distributed and centralized arc protection. The main advantage of distributed arc protection is a significant simplification of installation and after-service. But to implement the current control function requires the presence of an analog-to-digital converter in the terminal of arc protection, which significantly increases the cost of the device. Centralized arc protections are a cheaper and more cost-effective option.

**Keywords:** arc protection, microprocessor relay protection, reliability.

#### References

- [1] Fiber optic sensor systems for arc flash detection, Avago Technologies, 2014. [Online]. Available at: <http://docs.avagotech.com/docs/AV02-4503EN> [Accessed: Oct. 11, 2019].
- [2] V.I. Nagai, *Releynaya zashchita otvetitel'nykh podstantsiy elektricheskikh setey (Relay protection of branch substations of electric networks)*. Moscow: Energoatomizdat, 2002 (in Russian).
- [3] V.I. Nagai, «Bystrodeystvuyushchiye dugovyie zashchity KRU. Sovremennoye sostoyaniye i puti sovershenstvovaniya (High-speed arc protection of the switchgear. Current state and ways of improvement)», *Electric Engineering News*, vol. 5, no. 23, 2003 (in Russian).
- [4] V.I. Gurevich, «Printsip postroyeniya dugovoy zashchity raspredelitel'nykh ustroystv 6-10 kV (The principle of arc protection of switchgear 6-10 kV)», *Energetika i elektrifikatsiya*, vol. 3, pp. 47-49, 1992 (in Russian).
- [5] Tekhnicheskiye trebovaniya k mikroprotsessornym ustroystvam RZA (Technical requirements for microprocessor devices of relay protection and automation devices). STO 56947007-29.120.70.241-2017. Approved and enforced by the order of FGC UES PJSC dated 02.28.2017 No. 82 (in Russian).