

## Устройства защиты от перенапряжений распределительных электрических систем

ШВЕЦ Н.Н., ЛЕПЁХИН Н.М., МИРОШНИЧЕНКО В.П., ОРЛОВ А.И.,  
СЫСОЕВ В.С., ДУБОВ И.В.  
РФЯЦ-ВНИИТФ, Истра, Россия

БАСОВ Е.В.  
ВЭИ – филиал РФЯЦ-ВНИИТФ, Москва, Россия

*Приводятся описание и результаты экспериментальных исследований устройств защиты от импульсных перенапряжений ограничивающего и комбинированного типов в распределительных электрических сетях 0,4 кВ. Устройства разработаны в четырех сейсмостойких конструктивных исполнениях с использованием нелинейных резисторов (варисторов) нового поколения и управляемых вакуумных разрядников. Разработанные защитные устройства предназначены для ограничения переходных перенапряжений, возникающих при воздействии электромагнитных импульсов техногенного, природного и коммутационного характера, до безопасного уровня, который для разработанных конструктивных исполнений защитных устройств лежит в диапазоне от 1,5 до 4,0 кВ, и отвода импульсов токов большой энергии (в импульсе до 500 кДж). Приведены результаты исследований коммутационных характеристик в номинальных (многократных) и максимальных (однократных) режимах работы рассматриваемых защитных устройств с измерением предельных напряжений на их выводах. Выполнена оценка практической эффективности использования устройств защиты комбинированного типа и даны сравнительные тактико-технические характеристики устройств защиты различных производителей.*

**Ключевые слова:** электрические сети, токи молнии, электромагнитные импульсы, импульсные перенапряжения, устройства защиты комбинированного типа, устройства защиты ограничивающего типа, нелинейные резисторы (варисторы), управляемые вакуумные разрядники

Проблемы электромагнитной совместимости и молниезащиты в электроэнергетике [1, 2], а также обеспечения устойчивости работы электротехнических устройств в условиях сложной электромагнитной обстановки являются актуальными. Так, в [3] показана необходимость практического определения эффективности использования существующих (и перспективных) защитных устройств и систем для обеспечения стойкости электротехнического оборудования к воздействию электромагнитного импульса высотного ядерного взрыва, преднамеренным деструктивным воздействиям мощных электромагнитных излучателей и грозовых перенапряжений.

Существует также необходимость практического определения эффективности использования вновь разрабатываемых [4] устройств защиты от импульсных перенапряжений (далее УЗИП) в сейсмостойких конструктивных исполнениях (с повышенной механической прочностью), которые предназначены для защиты электрооборудования в воздушных и кабельных сетях переменного тока при деструктивных воздействиях импульсных перенапряжений большой энергии (в импульсе до 500 кДж), возникающих из-за электромаг-

нитных импульсов (ЭМИ) техногенного и природного характера.

Стандарт МЭК [5] определяет зоны молниезащиты с точки зрения прямого и непрямого воздействия молнии. Основные классы УЗИП для электрических сетей, методики их испытаний и принципы применения приведены в стандартах МЭК [6–8]. Согласно [6–8] УЗИП делятся на классы в зависимости от требований к испытаниям на безопасность, работоспособность и способности отводить импульсные токи. При этом для защиты оборудования (потребителей электроэнергии) от грозовых и коммутационных импульсных перенапряжений могут применяться УЗИП трех типов [8]: УЗИП *коммутирующего типа*, которые в отсутствие перенапряжений сохраняют высокое полное сопротивление, но могут мгновенно изменить его на низкое в ответ на скачок напряжения; УЗИП *ограничивающего типа*, которые в отсутствие перенапряжений сохраняют высокое полное сопротивление, но постепенно снижают его с возрастанием волны тока и напряжения; УЗИП *комбинированного типа*, в которых защита выполняется при действии (срабатывании) элементов как коммутирующего, так и ограничивающего типов, кото-

рые могут коммутировать и ограничивать напряжение, а также выполнять обе функции. При этом действие элементов защиты зависит от характеристик подаваемого напряжения.

УЗИП различных классов и типов в настоящее время выпускаются рядом предприятий: АО «Хакель» (Чехия–Россия) [9], OBO *Bettermann* (Германия) [10], *DEHN* (Германия) [11], *CITEL* (Франция) [12], *IEK GROUP* (Россия) [13], *ABB* (Швеция–Швейцария) [14] и др., т.е. разработка и производство УЗИП различных классов и типов являются актуальной проблемой.

В статье приводится описание опытных образцов УЗИП, выполненных в четырех сейсмостойких конструктивных исполнениях, разработанных на основе нового поколения оксидно-цинковых нелинейных резисторов (варисторов) и управляемых вакуумных разрядников. Разработанные УЗИП подключаются параллельно к защищаемому электрооборудованию, установленному в силовых цепях переменного тока трехфазных воздушных и кабельных линий распределительных электропередач с уровнем номинального напряжения 0,4 кВ частотой 50/60 Гц сетей электропитания (СЭС) специальных фортификационных сооружений (СФС).

В состав разработанного типового ряда входят опытные образцы УЗИП:

класса защиты 1 тип 1 (комбинированного типа с остаточным напряжением<sup>1</sup>  $U_{res1} < 4$  кВ);

класса защиты 1 тип 2 (комбинированного типа с  $U_{res} < 2,5$  кВ);

класса защиты 2 (ограничивающего типа с уровнем напряжения защиты<sup>2</sup>  $U_p < 2,5$  кВ);

класса защиты 3 (ограничивающего типа с  $U_p < 1,5$  кВ).

Работа УЗИП различных классов при ступенчатой защите с решением задачи о распределении импульсного тока между нелинейными элементами электрической цепи рассмотрена в [15]. Основные характеристики молнии и эффекты воздействия на аппаратуру одиночных и многократных молниевых разрядов исследованы в [16].

Ниже приводятся результаты экспериментальных исследований коммутационных характеристик разработанных УЗИП в номинальных (многократных) и максимальных (однократных) режимах с контролем *измеренного предельного напряжения*  $U_{mlv}$  (*measured limiting voltage*), т.е. максимальных значений напряжений, которые измеряются на выводах УЗИП при подаче импульсов заданной формы волны и амплитуды [8]. Кроме того, выполнена оценка практической эффек-

тивности использования разработанных УЗИП комбинированного типа и даны сравнительные тактико-технические характеристики разработанных опытных образцов и имеющихся на рынке устройств защиты.

#### **Принцип работы УЗИП комбинированного типа.**

Разработанные в соответствии с [4] опытные образцы УЗИП класса защиты 1 типов 1 и 2 (далее УЗИП класса 1 тип 1(2)) состоят из трех однофазных устройств защиты от импульсных перенапряжений (полусов или модулей УЗИП). На рис.1 приведена принципиальная электрическая схема одного модуля УЗИП класса 1 тип 1(2).

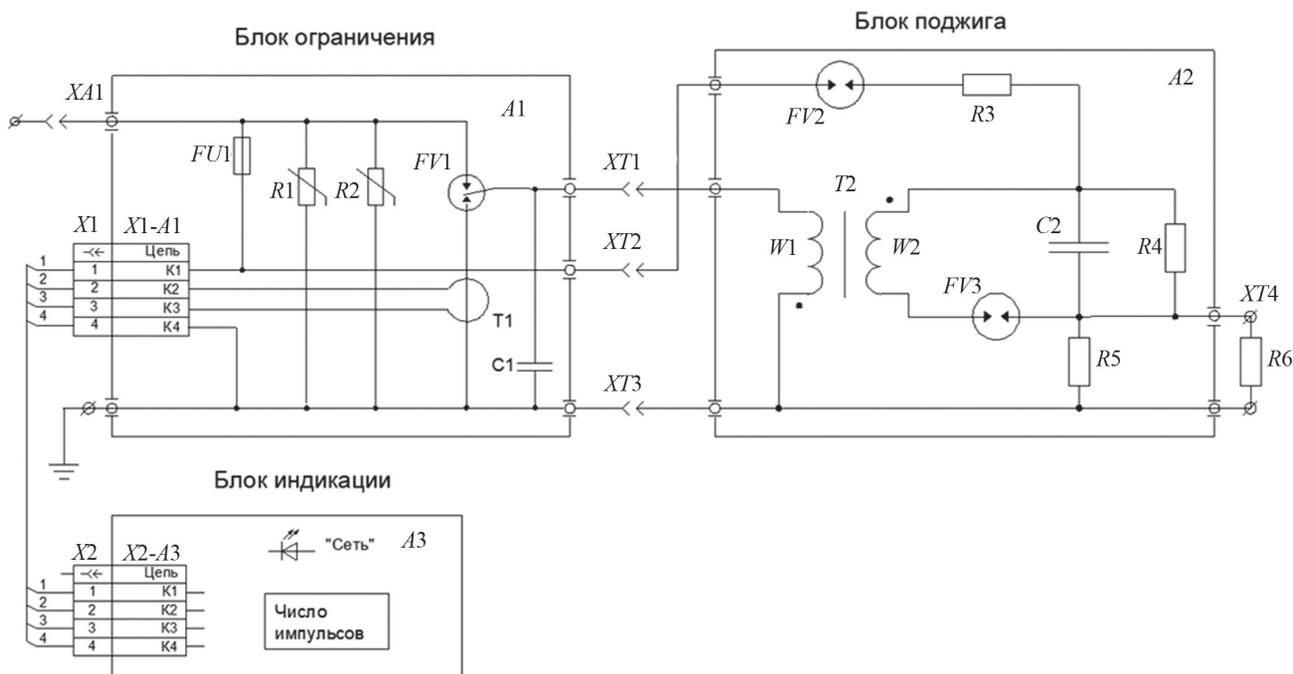
Как следует из принципиальной электрической схемы (рис. 1), УЗИП класса 1 тип 1(2) являются устройствами комбинированного типа, содержащими элементы как коммутирующего (управляемые вакуумные разрядники *FV1*), так и ограничивающего типа – низковольтные оксидно-цинковые резисторы (варисторы), т.е. нелинейные резисторы  $R1$  и  $R2$ , комплексное действие которых зависит от характеристик воздействующего перенапряжения и его длительности, т.е. значения энергетического фактора работы варисторов. При этом значения  $U_{mlv}$ , которые не должны превышать значений остаточных напряжений  $U_{res}$ , определяются техническими характеристиками резисторов  $R1$  и  $R2$ , а защитные функции УЗИП выполняются в несколько этапов.

На первом этапе входной импульс перенапряжения ограничивается индуктивностью соединительных проводов и ошиновки, которая с собственной емкостью резисторов  $R1$  и  $R2$  образует фильтр нижних частот (ФНЧ). В ФНЧ импульс перенапряжения интегрируется, при этом все гармонические составляющие импульса с частотой ниже частоты среза пропускаются почти без ослабления, а гармонические составляющие с частотой выше частоты среза быстро ослабевают и длительность фронта импульса перенапряжения существенно увеличивается. Ток через резисторы  $R1$  и  $R2$  определяется их собственной емкостью и составляет доли мА.

На втором этапе импульс перенапряжения ограничивается колонками варисторов  $R1$  и  $R2$ , которые переходят в высокопроводящее состояние. Минимальное время срабатывания  $R1$  и  $R2$  составляет ~ 25 нс. При этом ток через  $R1$  и  $R2$  возрастает на несколько порядков (до тысяч А), ограничивая дальнейшее нарастание напряжения на выводах УЗИП, а нагрев варисторов в целом определяет активная составляющая тока проводимости. Варисторы в течение срока службы выдерживают без повреждений воздействия, определяемые

<sup>1</sup> Остаточное напряжение  $U_{res}$  – пиковое значение напряжения, появляющееся на выводах УЗИП при прохождении разрядного тока [8].

<sup>2</sup> Уровень напряжения защиты  $U_p$  – максимальное напряжение, ожидаемое на выводах УЗИП в результате импульсного напряжения ограниченной крутизны и импульсного напряжения с разрядным током заданной амплитуды и формы волны. Уровень напряжения защиты устанавливает изготовитель, значение  $U_p$  должно быть выше наибольшего из измеренных ограниченных напряжений.



**Рис. 1.** Принципиальная электрическая схема фазного полюса УЗИП класса 1 тип 1(2):  $A1$  – блок ограничения;  $A2$  – блок поджига;  $A3$  – блок индикации;  $FV1$  – управляемый вакуумный разрядник;  $FV2, FV3$  – разрядники со стабилизированными значениями пробивных напряжений;  $T1$  – трансформатор тока;  $R1, R2$  – нелинейные резисторы (варисторы);  $R3, R4, R5, R6$  – линейные резисторы;  $FU1$  – предохранитель;  $C1, C2$  – накопительные конденсаторы

**Fig. 1.** Schematic diagram of phase pole of the type 1(2) class 1 SPD:  $A1$  – restriction unit;  $A2$  – ignition unit;  $A3$  – display unit;  $FV1$  – controlled vacuum arrester;  $FV2, FV3$  – arresters with stabilized values of breakdown voltages;  $T1$  – current transformer;  $R1, R2$  – nonlinear resistors (varistors);  $R3, R4, R5, R6$  – linear resistors;  $FU1$  – fuse;  $C1, C2$  – storage capacitors

зависимостью максимальной энергии коммутационных перенапряжений от времени приложения этих перенапряжений. Максимальная суммарная энергоёмкость варисторов выбирается на основе инженерного расчёта, задачей которого является определение приемлемых габаритных и стоимостных характеристик с учетом ресурса работы управляемого вакуумного разрядника  $FV1$ .

На третьем этапе происходит включение  $FV1$ , управляющий электрод которого связан с блоком поджига (управления)  $A2$ . Момент срабатывания блока  $A2$  определяется импульсом перенапряжения, поступающего на входную клемму  $XA1$  фазного провода, и статистическим временем срабатывания разрядников  $FV2$  и  $FV3$ . При включении  $FV1$  импульс с датчика трансформатора тока  $T1$  поступает на индикатор числа импульсов (количества срабатываний) блока индикации  $A3$ . Контроль количества срабатываний, определяемых по числу импульсов, позволяет контролировать ресурс работы  $FV1$ .

Используемые в разработке УЗИП управляемые вакуумные разрядники (РВУ) [17] способны работать в широком диапазоне напряжений (0,5–80 кВ) и импульсных токов (0,1–300 кА) при времени включения от 1,0 до 1,5 мкс. Во включенном состоянии падение напряжения на РВУ в силовом режиме (десятки кА и более) составляет 50–100 В, при этом РВУ способны

множественно (до 105 срабатываний) коммутировать сравнительно короткие (от единиц до десятков мкс) импульсы тока с количеством электричества в импульсе до 100 Кл при напряжении до 80 кВ.

Анализ параметров и технических характеристик РВУ [17], а также возможность их использования [18] показывают перспективность применения РВУ в устройствах защиты от импульсных перенапряжений. В экспериментально исследованных опытных образцах УЗИП применены разрядники типа РВУ-27-УХЛЗ.

Используемые в разработке УЗИП варисторы представляют собой диски с металлизированными торцевыми поверхностями. Практическая реализация устройства выполнена с использованием нового поколения оксидно-цинковых резисторов (варисторов) типа ВМС 57-4 и ВМС 57-8 [19].

В разработанной конструкции изделий в каждом модуле УЗИП класса 1 тип 1(2) имеются: блок ограничения  $A1$ , блок поджига  $A2$  и блок индикации  $A3$  (рис. 1). Основанием блока  $A1$ , который в собранном виде для обеспечения конструкционной прочности залит электроизоляционным компаундом, служит металлическая плита с четырьмя отверстиями для механического болтового крепления модулей УЗИП и присоединения к клемме «Земля». Для трехфазной сети три модуля УЗИП установлены на общем металлическом основании, которое заземлено. Блок  $A1$  оборудо-

ван также входной клеммой  $XA1$  для подключения к одной из фаз сети ( $A, B$  или  $C$ ).

Кроме того, блок  $A1$  содержит две идентичные параллельно соединенные колонки из дисков варисторов  $R1$  и  $R2$ . Диски электрически и механически соединены параллельно и сжаты между собой резьбовыми стяжками с помощью электроизоляционных планок, что обеспечивает возможность коммутировать импульсы тока со скоростью от 2,5 кА/мкс и выше. Также блок  $A1$  содержит установленный электрически параллельно колонкам  $R1$  и  $R2$  разрядник  $FV1$  типа РВУ-27-УХЛЗ, в катодной цепи которого установлен трансформатор тока  $T1$ . Блок  $A1$  содержит также предохранитель  $FU1$  и накопительный конденсатор  $C1$ .

Блок  $A2$  в собранном виде, как и блок  $A1$ , залит электроизоляционным компаундом, жестко прикреплен к блоку  $A1$  и необходим для запуска разрядника  $FV1$ . Схема запуска  $FV1$  содержит разрядники  $FV2$  и  $FV3$  со стабилизированными значениями пробивных напряжений, цепочку  $R3-C2-R5$ , постоянная времени которой регулируется резистором  $R6$ , определяющая время заряда конденсатора  $C2$  и момент срабатывания разрядника  $FV3$ . Постоянная времени цепочки и время включения разрядника  $FV3$  составляют ~50 мкс и определяются допустимым уровнем энергии, рассеиваемой в колонках из дисков  $R1$  и  $R2$ .

При возникновении импульса перенапряжения срабатывает неуправляемый разрядник  $FV2$  и через  $R3$  и параллельно соединенные  $R5$  и  $R6$  начинает заряжаться конденсатор  $C2$  до достижения (на  $C2$ ) пробивного напряжения разрядника  $FV3$ . При пробое разрядника  $FV3$  начинает разряжаться  $C2$  через высоковольтный импульсный трансформатор  $T2$ . Далее при заряде  $C1$  на управляющем электроде разрядника  $FV1$  возникает импульс напряжения, который вызывает пробой узла запуска разрядника  $FV1$  с последующим образованием плазмы между основными электродами  $FV1$  и его включение. Резистор  $R4$  служит для снятия остаточного напряжения с  $C2$  после прохождения импульса перенапряжения.

Блок индикации  $A3$  подсоединен кабелем через разъем  $X1$  блока  $A1$  к трансформатору тока  $T1$ , установленному в катодной цепи разрядника  $FV1$ . При пробое  $FV3$  и запуске  $FV1$  и его включении сигнал с  $T1$  вызовет срабатывание счетчика импульсов блока  $A3$ . В табл. 1 приведены тактико-технические характеристики УЗИП класса 1 типов 1 и 2.

**Принцип работы УЗИП ограничивающего типа.** Принцип работы УЗИП классов защиты 2 и 3 (далее УЗИП класса 2(3)), которые для трехфазного исполнения состоят из трех однофазных устройств защиты от импульсных перенапряжений (полюсов или модулей УЗИП), основан на работе нелинейных резисторов, т.е. на поглощении энергии ЭМИ, возникающих в сетях электроснабжения специальных фортификационных сооружений (СЭС СФС). На рис. 2 представлена прин-

ципальная электрическая схема УЗИП класса 2(3) для трехфазного исполнения, в которых (выполненных в соответствии с [4]) варисторы  $R1, R2, R3$  содержат по две идентичных параллельно соединенных колонки из дисков нелинейных резисторов на основе варисторов. По принципу работы такие изделия являются УЗИП ограничивающего типа, в которых уровень остаточного напряжения, не превышающего допустимого значения ( $U_p = 2,5$  кВ для УЗИП класса 2;  $U_p = 1,5$  кВ для УЗИП класса 3), осуществляется блоками варисторов  $R1, R2, R3$  (колонками низковольтных оксидно-цинковых резисторов), т.е. определяются их техническими характеристиками. При этом защитные функции УЗИП выполняются в несколько этапов следующим образом.

На первом этапе скорость нарастания воздействующего импульса напряжения входного импульса перенапряжения ограничивается индуктивностью соединительных проводов и ошиновки. При этом ток через  $R1, R2, R3$  определяется их собственной емкостью и составляет доли мА.

На втором этапе импульс перенапряжения ограничивается колонками  $R1, R2, R3$  до уровня напряжения, не превышающего допустимого значения. При этом  $R1, R2, R3$  переходят в высокопроводящее состояние. Ток через  $R1, R2, R3$  возрастает на несколько порядков (до тысяч А), ограничивая таким образом дальнейшее

Таблица 1

**Тактико-технические характеристики УЗИП класса 1 тип 1(2)**  
**Tactical and technical characteristics of class 1 (1 and 2 types) SPD**

Параметры	Значение
Номинальное рабочее напряжение $U_o$ , кВ	0,22/0,38
Максимальное длительное рабочее напряжение $U_c$ , кВ	0,24/0,42
Остаточное напряжение $U_{res}$ , кВ	
тип 1	4
тип 2	2,5
Сопrotивление изоляции цепи «фаза-земля», МОм	100
Принцип действия	комбинированного типа
Число полюсов	3

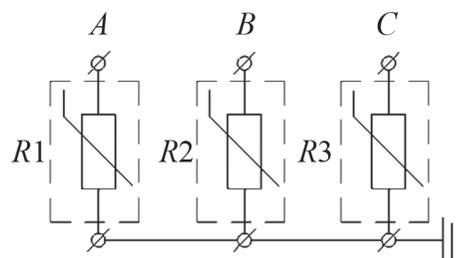


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема УЗИП класса 2(3) для трехфазного исполнения

Fig. 2. Schematic diagram of the class 2(3) SPD for three-phase design

нарастание напряжения на выводах УЗИП. Минимальное время срабатывания варисторов составляет ~ 25 нс (реально длительность фронта импульса разрядного тока молнии через резисторы значительно превышает время срабатывания из-за индуктивности соединительных проводов и ошиновки).

При практической реализации в разработанных УЗИП применены элементы защиты ограничивающего типа на основе варисторов типа ВМС 57-4, ВМС 57-8 [19]. Для таких нелинейных резисторов время и напряжение срабатывания практически постоянны.

Разработанные УЗИП класса 2(3) состоят из трех однофазных устройств защиты от импульсных перенапряжений (полюсов или модулей). Каждый модуль содержит две идентичные параллельно соединенные колонки из дисков варисторов. Диски электрически и механически соединены параллельно и сжаты между собой резьбовыми стяжками с помощью электроизоляционных планок.

Каждый модуль УЗИП класса 2(3), в собранном виде залитый электроизоляционным компаундом, установлен на металлической плите с четырьмя отверстиями для болтового крепления модулей и присоединения к клемме «Земля». Для трехфазной сети три полюса (модуля) УЗИП установлены на общем металлическом основании, которое заземлено. Каждый модуль оборудован входной клеммой для подключения к одной из фаз сети (А, В или С). Тактико-технические характеристики УЗИП класса 2(3) приведены в табл. 2.

**Результаты экспериментальных исследований.**

Опытные образцы УЗИП испытывались в Высоковольтном научно-исследовательском центре (ВНИЦ) ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина» на установке типа ГИТ-50/5М, входящей в состав

Таблица 2

**Тактико-технические характеристики УЗИП класса 2(3)**

**Tactical and technical characteristics of class 2(3) SPD**

Параметры	Значение
Номинальное рабочее напряжение $U_o$ , кВ	0,22/0,38
Максимальное длительное рабочее напряжение $U_c$ , кВ	0,24/0,42
Токи утечки в каждом полюсе относительно корпуса при напряжении переменного тока 220 В, частотой 50 Гц, А	$6 \times 10^{-3}$
Уровень напряжения защиты $U_p$ , кВ класс 2 класс 3	2,5 1,5
Принцип действия	ограничивающего типа
Число полюсов	3

уникальной научной установки «Комплексный высоковольтный стенд» (далее УНУ КВС). На рис.3 представлена блок-схема установки ГИТ-50/5-М для испытаний УЗИП.

Испытательная установка ГИТ 50/5-М состоит из пульта управления, двух зарядных устройств (5 и 50 кВ), двух генераторов импульсных токов ГИТ-5 кВ и ГИТ-50 кВ, выполненных на базе емкостных накопителей энергии, а также источника сетевого напряжения 220 В, 50 Гц, для которого ожидаемый ток КЗ источника питания  $I_p$  (ток, который протекал бы в данном месте цепи, если бы в этом месте она была замкнута коротко проводником с незначительным сопротивлением [8]) составляет 30 кА. Емкостной накопитель энергии генератора ГИТ-50 кВ выполнен на конденсаторах ИК50-6 и ИК50-3, объединенных в блоки малоиндук-

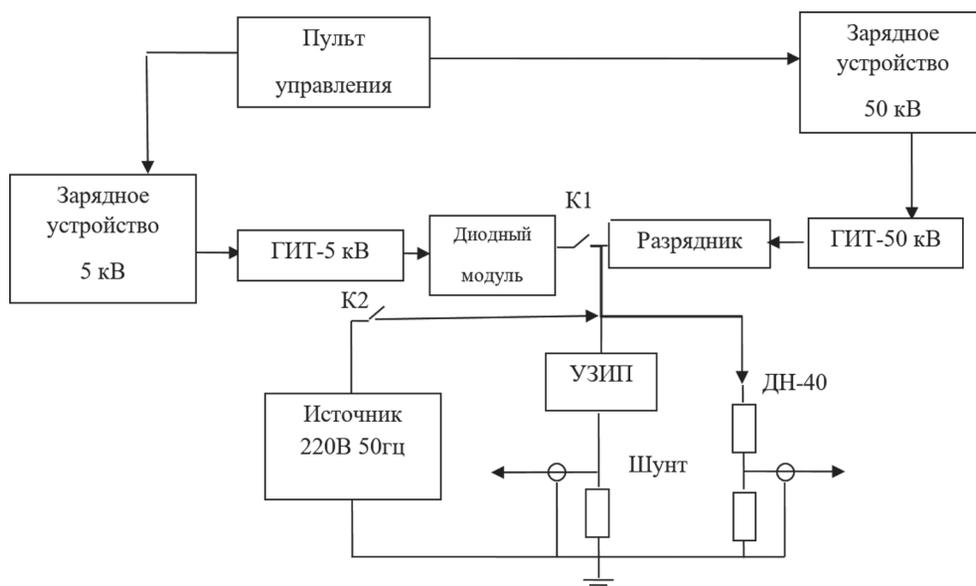


Рис. 3. Блок-схема установки ГИТ 50/5-М для испытаний УЗИП

Fig. 3. Block diagram of the equipment GIT 50/5-M for SPD testing

тивной ошиновкой. Выходной разрядник установки – РВУ-81М [17] с управлением от блока поджига. Емкостной накопитель энергии генератора ГИТ-5 кВ состоит из семи модулей. Каждый модуль состоит из пяти блоков, в каждом из которых имеется 50 параллельно соединенных конденсаторов К-75-40, 40 мкФ, 5 кВ. Электрическая развязка генераторов ГИТ-5 кВ и ГИТ-50 кВ выполняется диодным модулем и коммутатором К1. Источник сетевого напряжения 220 В, 50 Гц, в котором ожидаемый ток КЗ источника питания  $I_p = 30$  кА, присоединяется к установке коммутатором К2 только при оценке эффективности работы УЗИП.

При проведении испытаний установка ГИТ 50/5-М настраивалась на требуемую форму и амплитуду импульсов тока с помощью разрядных резисторов при замкнутом коммутаторе К1 и разомкнутом коммутаторе К2 (рис. 3). Измерительная система состояла из первичных преобразователей (датчиков тока и напряжения), линий связи и аналого-цифровых регистраторов. Для проведения измерений испытуемые УЗИП были соединены с «землей» через шунт с сопротивлением 0,2 мОм. Напряжение измерялось с помощью делителя напряжения *Tektronix* Р6015 (ДН-40) с коэффициентом деления 1/1000. Регистрирующая аппаратура была расположена в экранированном помещении.

При испытаниях проводилась регистрация формы и максимального значения тока через каждый полюс УЗИП, а также формы и значения предельного (остаточного) напряжения. Погрешность измерения максимальных значений тока и напряжения не превышала 5 %, а погрешность измерения формы импульсов тока и напряжения – 15 %. Регистрация напряжения и тока проводилась двухканальным осциллографом с полосой пропускания не хуже 200 МГц типа *Tektronix* TDS 2024. Применяемые на установке ГИТ 50/5-М средства измерения имеют сертификаты о регистрации в Государственном реестре.

Испытаниям подвергались три опытных образца УЗИП: классов защиты 1 (тип 2), 2 и 3.

На рис. 4 и 5 представлен общий вид опытных образцов соответственно УЗИП класса 1 тип 2 и УЗИП класса 3. Общий вид и габаритные размеры УЗИП класса 1 типов 1 и 2 совпадают. Общий вид УЗИП классов 2 и 3 также совпадает, отличаются массогабаритные характеристики.

Перед проведением экспериментальных исследований коммутационных характеристик опытных образцов была выполнена оценка скорости нарастания воздействующих импульсов напряжения, формируемых установкой ГИТ 50/5-М путем измерения амплитуды и фронта выходного импульса напряжения от установки в режиме ХХ (коммутаторы К1 и К2 разомкнуты, УЗИП отсоединено). На рис. 6 представлена осциллограмма импульса напряжения, формируемого установкой ГИТ 50/5-М в режиме ХХ.

Из осциллограммы (рис. 6) следует, что при амплитуде импульса напряжения 20 кВ и времени нарастания

фронта импульса 64 нс скорость нарастания воздействующих импульсов напряжения, формируемых установкой ГИТ 50/5-М, составляет  $dU/dt = 20 \text{ кВ}/64 \cdot 10^{-9} \text{ с} = 300 \text{ кВ}/\text{мкс}$ .

Затем был испытан варистор ВМС-57-8-2-УХЛ4, на который было подано 5 импульсов тока формой 10/350 мкс амплитудой 11 кА с учетом того, что в УЗИП класса 1 тип 1(2) в каждом полюсе используется 14 параллельно соединенных варисторов, через каждый из которых при общем импульсном токе молнии 150 кА, определяемом требованиями на разработку, должен протекать ток 10,7 кА. На рис. 7 приведены осциллограммы импульсов тока и напряжения при испытаниях единичного варистора ВМС-57-8-2-УХЛ4 импульсами тока формой 10/350 мкс.

Из осциллограмм (рис. 7) следует, что единичный варистор успешно выдерживает испытания импульсным током формой 10/350 мкс амплитудой 11 кА с  $di/dt = 2,5 \text{ кА}/\text{мкс}$ , при этом  $U_{mv} = 1200 \text{ В}$ .

Для оценки энергетических характеристик варисторов и правильности конструктивных решений были проведены испытания колонки из семи параллельно включенных варисторов ВМС-57-8-2-УХЛ4, что составляет половину количества варисторов в модуле

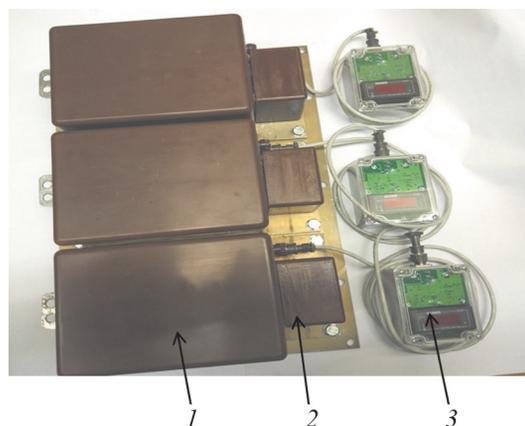


Рис. 4. Общий вид УЗИП класса 1 тип 2: 1 – блок ограничения; 2 – блок поджига; 3 – блок индикации

Fig. 4. A general view of the class 1 type 2 prototype SPD: 1 – restriction unit; 2 – ignition unit; 3 – display unit



Рис. 5. Общий вид УЗИП класса 3

Fig. 5. General view of the prototype SPD class 3

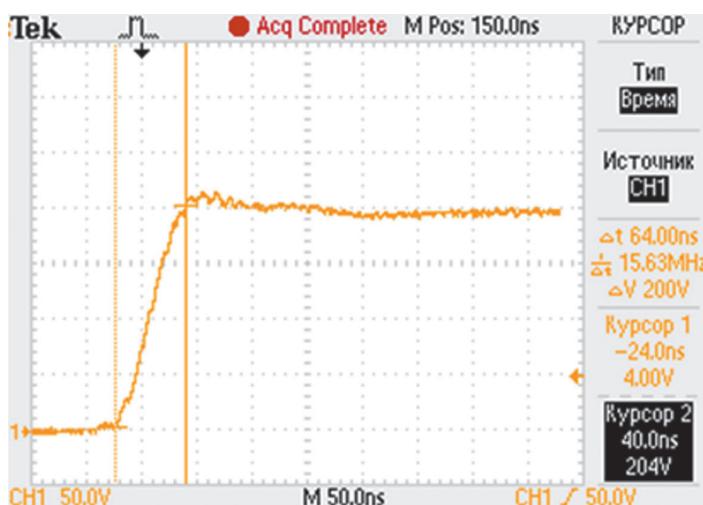


Рис. 6. Осциллограмма импульса напряжения, формируемого установкой ГИТ 50/5-М в режиме XX:  $m_u = 5$  кВ/дел.;  $m_t = 50$  нс/дел.  
 Fig. 6. Oscillogram of the voltage pulse generated by the equipment GIT 50/5-M in idle mode:  $m_u = 5$  kV/div.;  $m_t = 50$  ns/div

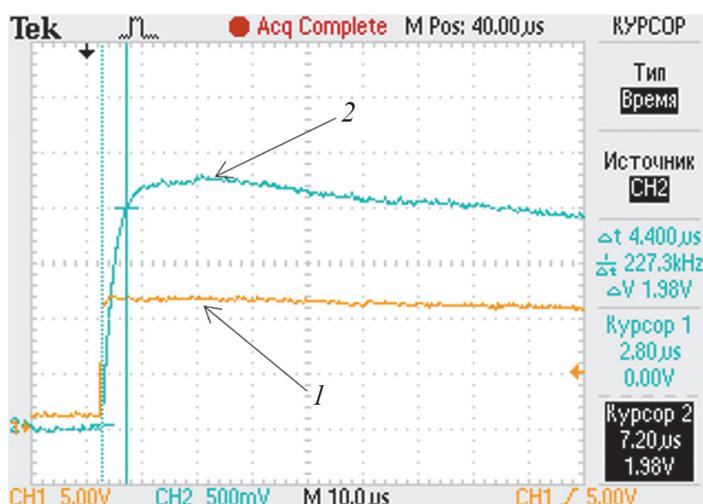


Рис. 7. Осциллограммы импульсов тока и напряжения при испытаниях варистора ВМС-57-8-2-УХЛ4 импульсами тока формой 10/350 мкс: 1 – напряжение,  $m_u = 0,5$  кВ/дел.; 2 – ток,  $m_i = 2,5$ кА/дел.;  $m_t = 10$ мкс/дел.;  $I_{max} = 11$  кА;  $di/dt = 2,5$  кА/мкс.;  $U_{mlv} = 1200$  В  
 Fig. 7. Oscillograms of current and voltage pulses during tests of a single varistor VMS-57-8-2-UHL4 with current pulses in the form of 10/350 µs: 1 – voltage,  $m_u = 0,5$  kV/div.; 2 – current,  $m_i = 2,5$  kA/div.;  $m_t = 10$  µs/div.;  $I_{max} = 11$  kA;  $di/dt = 2,5$  kA/µs.;  $U_{mlv} = 1200$  V

УЗИП. На колонку подавалось два импульса формой 10/50 мкс амплитудой более 75 кА с интервалом менее 5 мин. Осциллограммы импульсов тока и напряжения приведены на рис. 8.

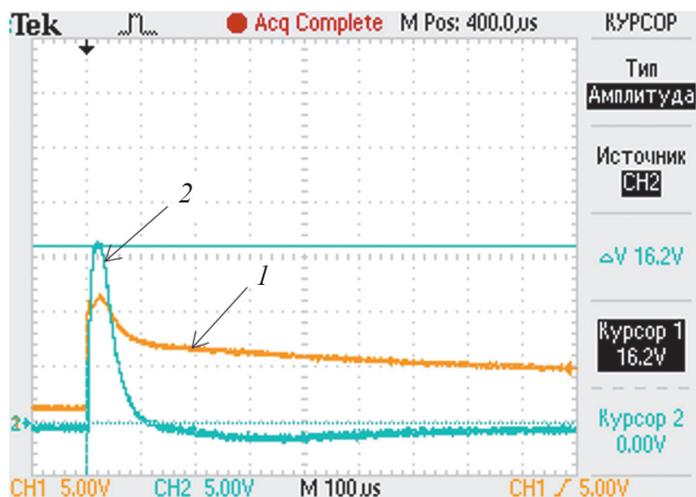
Из осциллограмм (рис. 8) следует, что колонка варисторов успешно выдерживает испытания импульсным током молнии формой 10/50 мкс амплитудой 81 кА с  $di/dt \sim 4,5$ кА/мкс, при этом  $U_{mlv} = 1200$  В.

Далее были исследованы коммутационные характеристики каждого полюса УЗИП: на номинальные разрядные токи молнии формой 8/20 мкс, номинальные (многократные) разрядные токи ЭМИ и максимальные (однократные) разрядные токи ЭМИ формой 10/5000 мкс. Дополнительно УЗИП классов 2 и 3 подвергались испытаниям на максимальные разрядные токи молнии,

формой волны тока 8/20 мкс с амплитудой соответственно 75 и 50 кА.

Экспериментальные исследования коммутационных характеристик опытных образцов УЗИП выполнялись с контролем значений измеренных предельных напряжений  $U_{mlv}$  при прохождении разрядных токов, значения которых должны быть не выше значений остаточных напряжений  $U_{res}$  и уровней напряжения защиты  $U_p$ . Контроль предельных напряжений  $U_{mlv}$  выполнялся методом измерения по осциллограммам максимальных значений напряжений на выводах УЗИП при подаче импульсов заданной формы волны и амплитуды.

В табл. 3 приведены результаты испытаний опытных образцов УЗИП классов 1(тип 2), 2 и 3 при воздействии:



**Рис. 8.** Осциллограммы импульсов тока и напряжения при испытаниях колонки из семи параллельно включенных варисторов импульсами тока формой 10/50 мкс: 1 – напряжение,  $m_u = 0,5$  кВ/дел.; 2 – ток,  $m_i = 25$  кА/дел.;  $m_t = 100$  мкс/дел.;  $I_{max} = 81$  кА;  $di/dt \sim 4,5$  кА/мкс;  $U_{miv} = 1200$  В

**Fig. 8.** Oscillograms of the flow pulse and voltage during testing of a column of seven parallel switched on varistors by current pulses in the form of 10/50  $\mu$ s: 1 – voltage,  $m_u = 0,5$  kV/div.; 2 – current,  $m_i = 25$ kA/div.;  $m_t = 100$   $\mu$ s/div.;  $I_{max} = 81$  kA;  $di/dt \sim 4,5$  kA/ $\mu$ s;  $U_{miv} = 1200$  V

Таблица 3

**Результаты испытаний разработанных УЗИП**  
**Test results of the developed SPD**

Измеренные параметры	Фаза ЗУ	Защитное устройство (ЗУ)		
		УЗИП класса 1 тип 2	УЗИП класса 2	УЗИП класса 3
Предельное напряжение/амплитуда номинальных разрядных токов молнии формой 8/20 мкс, $U_{miv},$ кВ/ $I_n,$ кА	A	1,80/75	1,52/54	0,90/10
	B	1,85/80	1,51/53	0,95/11
	C	1,94/84	1,50/52	0,86/10
Предельное напряжение/амплитуда максимального разрядного тока молнии формой 8/20 мкс, $U_{miv},$ кВ/ $I_{max},$ кА	A	–	1,88/80	1,34/50
	B	–	1,85/75	1,32/50
	C	–	1,85/75	1,34/51
Предельное напряжение/амплитуда номинальных (многократных) разрядных токов ЭМИ формой 10/5000 мкс, $U_{miv},$ кВ/ $I_{нЭМИ},$ кА	A	1,48/51	1,40/5,2	0,8/1,0
	B	1,45/50	1,38/5,1	0,75/1,0
	C	1,47/50	1,30/5,0	0,70/1,0
Предельное напряжение/максимальный (однократный) разрядный ток ЭМИ формой 10/5000 мкс, $U_{miv},$ кВ/ $I_{maxЭМИ},$ кА	A	–	1,30/10,2	0,75/5,8
	B	–	1,28/10,0	1,20/5,0
	C	–	1,40/10,8	0,65/5,8
Предельное напряжение/амплитуда импульсного тока формой 10/350 мкс, $U_{miv},$ кВ/ $I_{imp75},$ кА	A	1,52 /75	–	–
	B	1,60 /77	–	–
	C	1,60 /77	–	–

номинальных разрядных токов молнии  $I_n$  формой 8/20 мкс амплитудой соответственно 75, 50 и 10 кА;

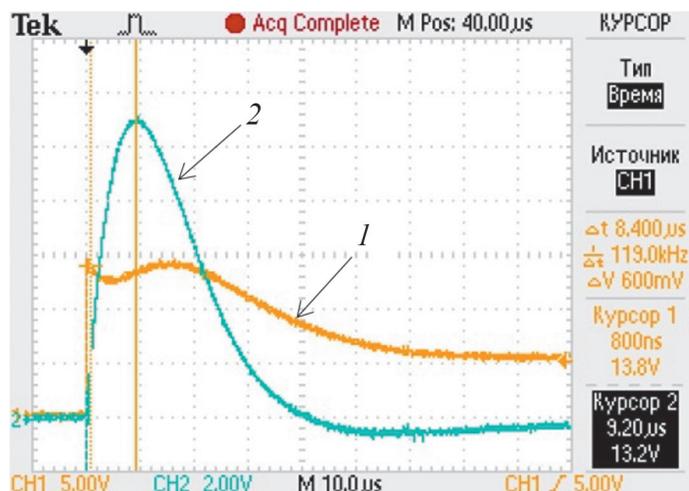
максимальных  $I_{max}$  разрядных токов молнии формой 8/20 мкс амплитудой соответственно 75 и 50 кА;

номинальных (многократных) разрядных токов ЭМИ  $I_{нЭМИ}$  формой 10/5000 мкс амплитудой соответственно 50, 5 и 1 кА;

максимальных (однократных) разрядных токов ЭМИ  $I_{maxЭМИ}$  формой 10/5000мкс амплитудой соответственно 10 и 5 кА.

Кроме того, опытный образец УЗИП класса 1 тип 2 испытывался на импульсный ток 75 кА  $I_{imp75}$  формой 10/350 мкс путем последовательной подачи двух импульсов тока с амплитудой не менее 75 кА с интервалом менее 5 мин (комбинацией токов формой 10/350 мкс с амплитудой не менее 75 кА).

На рис. 9 приведены осциллограммы импульсов тока и напряжения при воздействии на УЗИП класса 3 максимального разрядного тока молнии  $I_{max}$  формой 8/20 мкс.



**Рис. 9.** Осциллограммы импульсов тока и напряжения при воздействии на УЗИП класса 3 максимального разрядного тока молнии  $I_{\max}$  формой 8/20 мкс: 1 – напряжение,  $m_u = 0,5$  кВ/дел.; 2 – ток,  $m_i = 10$  кА/дел.;  $m_t = 10$  мкс/дел.;  $I_{\max} = 54$  кА;  $di/dt \sim 7,5$  кА/мкс.;  $U_{\text{miv}} = 1380$  В

**Fig. 9.** Current and voltage oscillograms when exposed to the SPD of class 3 of the maximum lightning discharge current  $I_{\max}$  in the form of 8/20  $\mu\text{s}$ : 1 – voltage,  $m_u = 0,5$  kV/div.; 2 – current,  $m_i = 10$  kA/div.;  $m_t = 10$   $\mu\text{s}$ /div.;  $I_{\max} = 54$  kA;  $di/dt \sim 7,5$  kA/ $\mu\text{s}$ .;  $U_{\text{miv}} = 1380$  V

Из осциллограмм (рис. 9) следует, что УЗИП класса 3 успешно выдерживает испытания импульсным током молнии формой 8/20 мкс амплитудой  $I_{\max} = 54$  кА с  $di/dt \sim 7,5$  кА/мкс, при этом  $U_{\text{miv}} = 1380$  В.

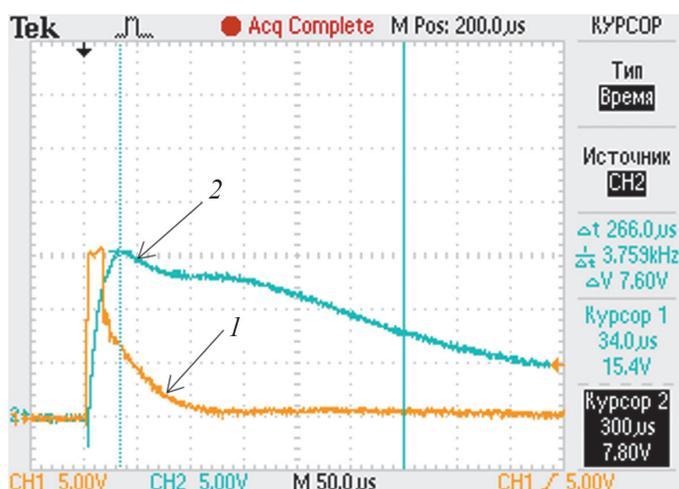
На рис. 10 представлены осциллограммы импульсов тока и напряжения при последовательной подаче на УЗИП класса 1 тип 2 двух импульсов тока  $I_{\text{imp}75}$  формой 10/350 мкс амплитудой не менее 75 кА с интервалом менее 5 мин.

Из осциллограмм (рис. 10) следует, что УЗИП класса 1 тип 2 успешно выдерживает испытания последовательной подачи двух импульсов тока молнии формой 10/350 мкс амплитудой  $I_{\max} = 75$  кА, при этом  $U_{\text{miv}} = 1520$  В.

После испытаний в каждом полюсе УЗИП относительно корпуса при напряжении переменного тока 220 В частотой 50 Гц были измерены токи утечки, значения которых не превысили 4,9 мА. При этом токи утечки после испытаний опытных образцов УЗИП класса 1 тип 2 на импульсный ток формой 10/350 мкс при последовательной подаче на каждый модуль импульсов тока амплитудой не менее 75 кА не превысили 4,6 мА.

#### Оценка практической эффективности УЗИП.

Эффективность использования опытных образцов УЗИП класса 1 тип 2 при воздействии мощных ЭМИ или грозовых перенапряжений определена экспериментально при испытаниях УЗИП в составе УНУ КВС. На рис. 3 представлена блок-схема установки ГИТ



**Рис. 10.** Осциллограммы импульсов тока и напряжения при последовательной подаче на УЗИП класса 1 тип 2 двух импульсов тока  $I_{\text{imp}75}$  формой 10/350 мкс амплитудой не менее 75 кА: 1 – напряжение,  $m_u = 0,5$  кВ/дел.; 2 – ток,  $m_i = 25$  кА/дел.;  $m_t = 50$  мкс/дел.;  $I_{\max} = 75$  кА,  $U_{\text{miv}} = 1520$  В

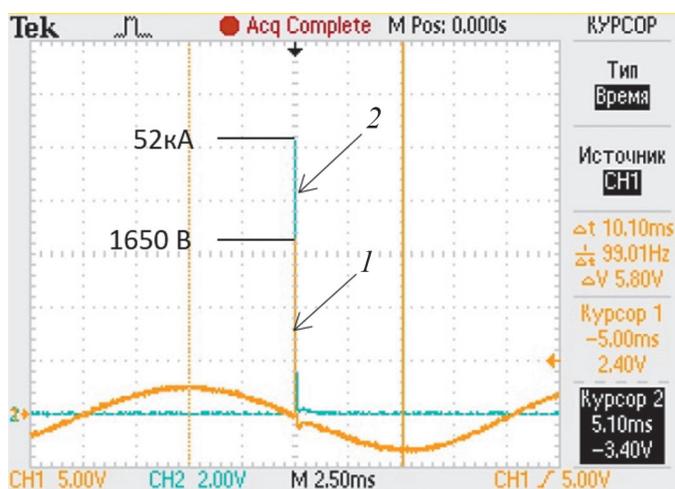
**Fig. 10.** Current and voltage oscillograms with sequential supply to the SPD of class 1 type 2 of two lightning current pulses  $I_{\text{imp}75}$  with an amplitude of at least 75 kA in the form of 10/350  $\mu\text{s}$ : 1 – voltage,  $m_u = 0,5$  kV/div.; 2 – current,  $m_i = 25$  kA/div.;  $m_t = 50$   $\mu\text{s}$ /div.;  $I_{\max} = 75$  kA,  $U_{\text{miv}} = 1520$  V

50/5-М, когда источник сетевого напряжения 220 В, 50 Гц с ожидаемым током КЗ источника питания 30 кА подключен к УЗИП (коммутаторы К1 и К2 замкнуты).

*Порядок выполнения эксперимента.* На опытный образец УЗИП подавались импульсы напряжения, обеспечивающие импульсы тока формой 8/20 и 10/5000 мкс. Регистрировались форма и максимальное значение тока через УЗИП, а также форма и значение остаточного напряжения. Осциллограммы импульсов тока и напряжения на выводах УЗИП класса 1 тип 2 при наложении на сетевое напряжение источника питания 220 В, 50 Гц импульса тока формой 8/20 мкс приведены на рис. 11.

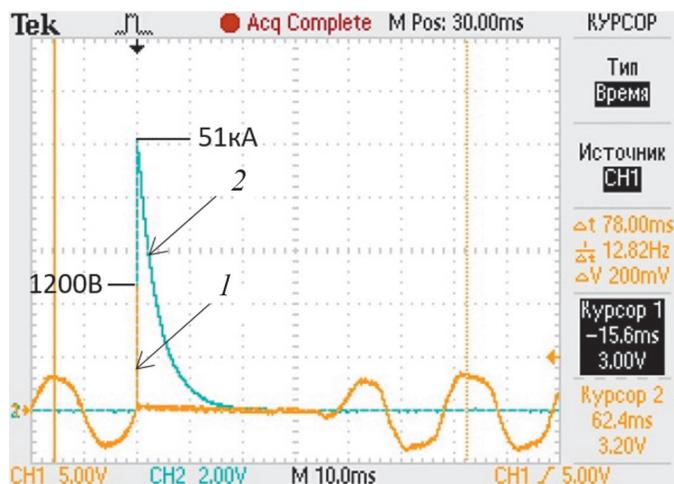
Осциллограммы импульсов тока и напряжения на выводах УЗИП класса 1 тип 2 при наложении на сетевое напряжение источника питания 220 В, 50 Гц импульса тока формой 10/5000 мкс приведены на рис.12.

Как следует из осциллограмм (рис. 11 и 12), если энергия импульса перенапряжения мала (рис. 11), то вакуумный разрядник при импульсе тока формой 8/20 мкс амплитудой  $I_{max} = 52$  кА не срабатывает и вся энергия перенапряжения отводится только варисторами. При этом перенапряжение в СЭС СФС при наличии УЗИП класса 1 тип 2, т.е. на нагрузке, которое не должно превышать значения остаточного напряжения  $U_{res} = 2,5$  кВ (табл. 1), будет составлять  $U_{mv} = 1650$  В (рис. 11).



**Рис. 11.** Осциллограммы импульсов тока и напряжения на выводах УЗИП класса 1 тип 2 при наложении на сетевое напряжение источника питания 220 В, 50 Гц импульса тока формой 8/20 мкс: 1 – напряжение,  $m_u = 0,5$  кВ/дел.; 2 – ток,  $m_i = 10$  кА/дел.;  $m_t = 2,5$  мс/дел.;  $I_{max} = 52$  кА,  $U_{mv} = 1650$  В

**Fig. 11.** Oscillograms of current and voltage at the contacts of SPD class 1 type 2 when a lightning current pulse of the form 8/20  $\mu$ s is applied to the mains voltage 220V, 50Hz: 1 – voltage,  $m_u = 0,5$  kV/div.; 2 – current,  $m_i = 10$  kA/div.;  $m_t = 2,5$  ms/div.;  $I_{max} = 52$  kA,  $U_{mv} = 1650$  V



**Рис. 12.** Осциллограммы импульсов тока и напряжения на выводах УЗИП класса 1 тип 2 при наложении на сетевое напряжение источника питания 220 В, 50 Гц импульса тока формой 10/5000 мкс: 1 – напряжение,  $m_u = 0,5$  кВ/дел.; 2 – ток,  $m_i = 10$ кА/дел.;  $m_t = 10$  мс/дел.;  $I_{max} = 51$  кА,  $U_{mv} = 1200$  В

**Fig. 12.** Oscillograms of current and voltage at the contacts of SPD protection class 1 type 2 when applied to the mains voltage 220 V, 50 Hz current pulse form 10/5000  $\mu$ s: 1 – voltage,  $m_u = 0,5$  kV/div.; 2 – current,  $m_i = 10$  kA/div.;  $m_t = 10$  ms/div.;  $I_{max} = 51$  kA,  $U_{mv} = 1200$  V

Когда энергия импульса перенапряжения велика, т.е. при большой длительности перенапряжения, то вакуумный разрядник при импульсе тока формой 10/5000 мкс с амплитудой  $I_{\max} = 51$  кА срабатывает (рис. 12), после срабатывания которого сетевое напряжение восстанавливается в ближайший полупериод после окончания перенапряжения. В данном случае – через 34 мс, т.е. пропущено менее чем два периода сетевого источника питания 220 В, 50 Гц, что вполне допустимо для селективного срабатывания как релейной защиты, так и установки автоматического повторного включения (АПВ), действующих в составе СЭС СФС. При этом перенапряжение в СЭС СФС при наличии УЗИП класса 1 тип 2, т.е. на нагрузке, которое не должно превышать  $U_{res} = 2,5$  кВ (табл. 1), будет составлять, как следует из осциллограммы (рис. 12),  $U_{mv} = 1200$  В.

**Сравнительная эффективность УЗИП.** Основными требованиями к устройствам защиты потребителей электроэнергии от импульсных перенапряжений большой энергии являются надежность работы, высокая энергоемкость используемой элементной базы при приемлемых массогабаритных и стоимостных характеристиках, а также простота схемных решений. Сравнительные тактико-технические характеристики опытных образцов УЗИП и УЗИП, выпускаемых в России и Европе (9–14), приведены в табл. 4–6.

Сравнительные тактико-технические характеристики опытного образца УЗИП класса 2 и защитного устройства «Джоуль-28», серийно изготавливаемого ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», приведены в табл. 7.

Сравнительный анализ тактико-технических характеристик УЗИП (табл. 7) показывает, что разработанные УЗИП существенно не уступают или по некоторым параметрам превосходят известные аналоги, например по длительности импульсов тока ЭМИ. При этом разработанные УЗИП по некоторым из характеристик, например по скорости нарастания воздействующего импульса напряжения, превосходят известные аналоги в несколько раз, а по длительности фронта импульса тока – более чем на порядок.

**Выводы.** Показано, что опытные образцы разработанных УЗИП сохраняют свою работоспособность и обеспечивают необходимые защитные функции при воздействии импульсных перенапряжений с энергией в импульсе до 500 кДж, т.е. основными конструктивными и технико-эксплуатационными показателями разработанных УЗИП является высокая энергоемкость.

Эффективность опытных образцов УЗИП определяется как их малым влиянием на общие потери электроэнергии в электрических сетях (действующее значение токов утечки в каждом полюсе УЗИП при напряже-

Таблица 4

**Сравнительные характеристики УЗИП класса 1 и выпускаемых различными изготовителями**  
**Comparative characteristics of SPD class 1 and manufactured by different manufacturers**

Параметры	РФЯЦ-ВНИИТФ	Хакель Рос (Чехия-Россия)	СITEL (Франция)	DEHN (Германия)	ИнтерЭлектро-Комплект (ИЭК) (Россия)	Радиус (Россия)
	УЗИП класса 1 тип 1(2)	HZ110 и HG110	DS250VG, IP20, DIN-рейка 35 мм	DV M TNS 255 FM	ОПС1 С (II) DIN-рейка 35 мм	УЗИП2-2000-0,22
Номинальное рабочее напряжение (50/60 Гц), кВ	0,22/0,38	0,23	0,23/0,400 VAC	0,23/ 0,40В	0,40	0,22
Максимальное длительное рабочее напряжение $U_c$ , кВ	0,25/0,44	0,255	0,44	0,264	0,44	0,3
Остаточное напряжение $U_{res}$ , кВ Тип 1 Тип 2	4 кВ, 2,5 кВ	2,0кВ	1,5кВ	1,5кВ	2,0кВ	нет данных
Принцип действия	комбинир.	коммутирующий	комбинир.	комбинир.	огранич.	нет данных
Число полюсов	1, 2, 3	1	1, 2, 3, 4	1, 2, 3, 4	1, 2, 3, 4	нет данных
Параметры токов и напряжений ЭМИ						
Номинальный разрядный ток ЭМИ, выдерживаемый каждым полюсом, кА	50	нет данных	30	нет данных	30	нет данных
Максимальный разрядный ток ЭМИ, выдерживаемый каждым полюсом, кА	75	нет данных	70	нет данных	60	нет данных
Параметры токов и напряжений молнии и коммутационных перенапряжений						
Номинальный разрядный ток $I_n$ (8/20 мкс), кА	75	75	30	25/100	30	10

Таблица 5

**Сравнительные характеристики УЗИП класса 1 и выпускаемых различными изготовителями**  
**Comparative characteristics of SPD class 1 and manufactured by different manufacturers**

Параметры	РФЯЦ-ВНИИТФ	Хакель Рос (Чехия-Россия)	OBO Bettermann (Германия)	DEHN (Германия)	ИнтерЭлектро-Комплект (ИЭК) (Россия)	ABB (Швеция-Швейцария)
	УЗИП класса 2	ГСВ2-230/50 DIN-рейка 35 мм	V20-C/1+NPE	DG M TNS 275 FM	ОПС1-В 1P DIN-рейка 35 мм	OVR T2 3N 70 275s PTS
Номинальное рабочее напряжение (50/60Гц), кВ	0,22 / 0,38	0,23/0,325	0,23	0,23 / 0,40	0,40	0,23
Максимальное длительное рабочее напряжение $U_c$ , кВ	0,24 / 0,42	0,275/0,385	0,28	0,275	0,44	0,275
Уровень напряжения защиты $U_p$ , кВ	2,5	1,35	1,3	1,5	1,8	1,4
Принцип действия	огранич.	огранич.	огранич.	огранич.	огранич.	огранич.
Число полосов	1, 2, 3	1, 2, 3, 4	1, 2, 3, 4	1, 2, 3, 4	1, 2, 3, 4	1, 2, 3, 4
Параметры токов и напряжений молнии и коммутационных перенапряжений						
Максимальный разрядный ток $I_{max}$ (8/20 мкс), кА	75	50	40	25	40	80
Номинальный разрядный ток $I_n$ (8/20 мкс), кА	50	20	20	12,5	20	30

Таблица 6

**Сравнительные характеристики УЗИП класса 3 и выпускаемых различными изготовителями**  
**Comparative characteristics of SPD protection class 3 and manufactured by different manufacturers**

Параметры	РФЯЦ-ВНИИТФ	ЗАО «Хакель Рос» (Чехия-Россия)	OBO, Bettermann (Германия)	DEHN (Германия)	ИнтерЭлектро-Комплект (ИЭК) (Россия)	ABB (Швеция-Швейцария)
	УЗИП класса 3	ГСВ3-230/3 DIN-рейка 35 мм	V10-C/3+NPE+FS	DR M 2P 255 FM	ОПС1 D (III) DIN-рейка 35 мм	OVR T3 1N 260
Номинальное рабочее напряжение (50/60 Гц), кВ	0,22/0,38	0,23/0,300	0,22	0,23/0,255 В	0,23	0,23/0,400
Максимальное длительное рабочее напряжение $U_c$ , кВ	0,24/0,42	0,275	0,28	0,255	0,25	0,275/0,440
Уровень напряжения защиты $U_p$ , кВ	1,5	0,8	1,1	1,5	1,0	0,9
Принцип действия	огранич.	огранич.	огранич.	огранич.	огранич.	огранич.
Число полосов	1, 2, 3	1	1, 2, 3, 4	1, 2, 3, 4	1, 2, 4	1, 2, 3, 4
Параметры токов и напряжений молнии и коммутационных перенапряжений						
Максимальный разрядный ток $I_{max}$ (8/20 мкс), кА	50	нет данных	60	5	10	10
Номинальный разрядный ток $I_n$ (8/20 мкс), кА	10	10	30	3	5	3

Таблица 7

**Сравнительные характеристики УЗИП класса 2 и защитного устройства «Джоуль-28»**  
**Comparative characteristics of the class 2 SPD and the protective device "Joule-28"**

Тип защитного устройства	Джоуль-28	УЗИП класса 2
$U_{res}$ , кВ	2,0	2,5
Ток утечки, мА	6,0	6,0
Номинальный разрядный ток ЭМИ, кА	2,0	5,0
Максимальный разрядный ток ЭМИ, кА	5,0	10,0
Максимальный разрядный ток молнии (8/20 мкс), кА	–	75,0
Скорость нарастания воздействующего импульса напряжения, кВ/мкс	10,0	50,0
Длительность фронта импульса тока ЭМИ, мкс	5,0	0,5
Длительность импульса тока ЭМИ, мс	5,0	5,0
Масса, кг	11,77	15

нии переменного тока 220 В частотой 50 Гц не более,  $6 \cdot 10^{-3}$  А), так и приемлемым ресурсом работы, что обусловлено использованием управляемых вакуумных разрядников и нелинейных резисторов (варисторов) нового поколения.

Практическая эффективность использования опытных образцов УЗИП комбинированного типа в составе СЭС СФС является высокой. Экспериментально показано, что при подходе тока импульса перенапряжений к нулю УЗИП, в которых применены разрядники типа РВУ-27-УХЛЗ, способны ограничивать импульсы перенапряжений с восстановлением сетевого напряжения в ближайший полупериод (экспериментально через 34 мс). Это позволяет эффективно и простыми методами осуществить селективную работу релейной защиты СЭС СФС.

В задаче обеспечения устойчивости энергетических объектов Единой энергетической системы России к воздействию электромагнитного импульса высотного ядерного взрыва [3] разработанные опытные образцы УЗИП возможно использовать как в современных СЭС СФС, так и в воздушных и кабельных силовых распределительных электрических сетях напряжением 0,4 кВ переменного тока частотой 50/60 Гц при деструктивных воздействиях импульсных перенапряжений большой энергии для обеспечения защиты объектов гражданского назначения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Дьяков А.Ф. и др.** Электромагнитная совместимость и молниезащита в электроэнергетике. М.: Издательский дом МЭИ, 2016, 542 с.
2. **Базелян Э.М.** Электромагнитная совместимость с молнией. М.: ИМАГ, 2018, 152 с.
3. **Швец Н.Н. и др.** Об энергетической безопасности России в условиях воздействия электромагнитного импульса высотного ядерного взрыва. – Национальные интересы: приоритеты и безопасность, 2020, т. 16, № 11, с. 2036–2059.
4. **Пат. RU 194140 U1.** Устройство защиты от импульсных перенапряжений / Н.М. Лепёхин и др., 2019.
5. **ГОСТ Р МЭК 62305-1-2010.** Менеджмент риска. Защита от молнии. Часть 1. Общие принципы. М.: Стандартинформ, 2011, 46 с.
6. **ГОСТ Р 51992-2011.** Устройства защиты от импульсных перенапряжений в низковольтных силовых распределительных системах. Технические требования и методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2012, 55 с.
7. **ГОСТ 1516.3-96.** Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1998, 50 с.
8. **ГОСТ ИЕС 61643-11-2013.** Устройства защиты от перенапряжений низковольтные. Часть 11. Устройства защиты от перенапряжений, подсоединенные к низковольтным системам распределения электроэнергии. Требования и методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2015, 76 с.
9. **Сайт АО «Хакель»** [Электрон. ресурс], URL: <https://www.hakel.ru> (дата обращения 27.12.2021).
10. **Сайт OBO Bettermann** [Электрон. ресурс], URL: <https://www.obocom.ru> (дата обращения 27.12.2021).
11. **Сайт DEHN** [Электрон. ресурс], URL: <https://www.dehn.ru> (дата обращения 27.12.2021).
12. **Сайт CITEЛ** [Электрон. ресурс], URL: <https://citel.ru/ru> (дата обращения 27.12.2021).
13. **Сайт IEK GROUP** [Электрон. ресурс], URL: <https://www.iek.ru/> (дата обращения 27.12.2021).

14. **Сайт ABB** [Электрон. ресурс], URL: <https://new.abb.com/products/2CTB815708R0800/ovr-t2-3n-80-275s-p-ts-qs> (дата обращения 27.12.2021).

15. **Федоров А.И., Базелян Э.М.** Работа УЗИП при ступенчатой защите [Электрон. ресурс], URL: <https://docplayer.com/110765733-Rabota-uzip-pri-stupenchatoy-zashchite.html> (дата обращения 27.12.2021).

16. **Балюк Н.В. и др.** Воспроизведение электромагнитного действия одиночных и многократных молниевых разрядов. – Технологии электромагнитной совместимости, 2021, № 2(77), с. 3–19.

17. **Сайт ВЭИ АВИС** [Электрон. ресурс], URL: <http://vei-avis.ru/> (дата обращения 27.12.2021).

18. **Сидоров В.А. и др.** Высоковольтный быстродействующий коммутатор на основе вакуумных управляемых разрядников для коммутации переменного тока. – Электричество, 2018, № 4, с. 4–14.

19. **Сайт ЛМ Электро** [Электрон. ресурс], URL: <http://www.lme-opn.ru/> (дата обращения 27.12.2021).

[10.11.2021]



*Авторы: Швец Николай Николаевич – доктор экон. наук, советник директора ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академ. Е.И. Забабахина» (РФЯЦ-ВНИИТФ), Истра, Россия.*



*Лепёхин Николай Михайлович – кандидат техн. наук, начальник отдела РФЯЦ-ВНИИТФ, Истра, Россия.*



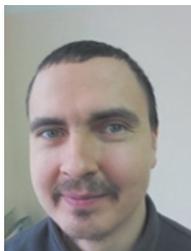
*Мирошниченко Валерий Петрович – ведущий научный сотрудник РФЯЦ-ВНИИТФ, Истра, Россия.*



*Орлов Александр Иванович – кандидат техн. наук, научный сотрудник РФЯЦ-ВНИИТФ, Истра, Россия.*



*Сысоев Владимир Степанович – кандидат техн. наук, начальник группы РФЯЦ-ВНИИТФ, Истра, Россия.*



**Дубов Игорь Владимирович** – инженер РФЯЦ-ВНИИТФ, Истра, Россия.



**Басов Евгений Валерьевич** – кандидат техн. наук, главный специалист Всероссийского электротехнического института (ВЭИ) – филиала ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академ. Е.И. Забабкина» (ВЭИ – филиал РФЯЦ-ВНИИТФ), Москва, Россия.

*Elektrichestvo*, 2022, No. 2, pp. 4–18

DOI:10.24160/0013-5380-2022-2-4-18

## Electric Power Distribution System Overvoltage Protection Devices

**SHVETS Nikolay N.** (FSUE "RFNC-VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin", Istra, Moscow region, Russia) – Counsel to the Director, Dr. Sci. (Econ.).

**LEPEKHIN Nikolay M.** (FSUE "RFNC-VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin", Istra, Moscow region, Russia) – Department Head, Cand. Sci. (Eng.).

**MIROSHNICHENKO Valery P.** (FSUE "RFNC-VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin", Istra, Moscow region, Russia) – Leading Researcher.

**Orlov Alexander I.** (FSUE "RFNC-VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin", Istra, Moscow region, Russia) – Research Fellow, Cand. Sci. (Eng.).

**SYSOEV Vladimir S.** (FSUE "RFNC-VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin", Istra, Moscow region, Russia) – Group Leader, Cand. Sci. (Eng.).

**DUBOV Igor V.** (FSUE "RFNC-VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin", Istra, Moscow region, Russia) – Engineer.

**BASOV Evgeniy V.** (All-Russian Electrotechnical Institute – Branch of FSUE "RFNC-VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin", Moscow, Russia) – Chief Specialist, Cand. Sci. (Eng.).

Surge protection devices of limiting and combined types used in 0.4 kV electric power distribution networks are described, and results of their experimental studies are presented. The devices have been developed in four earthquake-resistant designs with the use of new-generation nonlinear resistors (varistors) and controlled vacuum arresters. The developed protective devices are intended to limit transient overvoltages, which occur under the influence of man-made, natural and switching electromagnetic pulses, to a safe level, which for the developed design versions of protective devices lies in the range from 1.5 kV to 4.0 kV, and to remove pulses of high-energy currents (up to 500 kJ in a pulse). The article presents the results from studies of the switching characteristics of the developed protective devices in their nominal (multiple) and maximum (single) operation modes, with the measurement of limit voltages at their terminals. The practical effectiveness of using the combined type protective devices is estimated, and the performance characteristics of protection devices from different manufacturers are given.

**Key words:** electrical grids, lightning currents, electromagnetic pulses, pulse overvoltages, combined type protection devices, limiting type protection devices, nonlinear resistors (varistors), controlled vacuum arresters

### REFERENCES

1. **D'yakov A.F., et al.** *Elektromagnitnaya sovmestimost' i molniezashchita v elektroenergetike.* (Electromagnetic Compatibility and Lightning Protection in the Electric Power Industry). M.: Izdatel'skiy dom MEI, 2016, 542 p.

2. **Bazelyan E.M.** *Elektromagnitnaya sovmestimost' s molniey* (Electromagnetic Compatibility with Lightning). M.: IMAG, 2018, 152 p.

3. **Shvec N.N. et al.** *Nacional'nye interesy: priority i bezopasnost' – in Russ.* (National Interests: Priorities and Security), 2020, vol. 16, No. 11, pp. 2036–2059.

4. **Pat. RU 194140 U1.** *Ustroystvo zashchity ot impul'snykh perenapryazheniy* (Surge Protection Device) / N.M. Lepyokhin, et al, 2019.

5. **GOST R MEK 62305-1-2010.** *Menedzhment riska. Zashchita ot molnii. Chast' 1. Obshchie principy* (Risk Management. Protection Against Lightning. Part 1. General Principles). M.: Standartinform, 2011, 46 p.

6. **GOST R 51992-2011.** *Ustroystva zashchity ot impul'snyh perenapryazheniy v nizkovol'nykh silovykh raspredelitel'nykh sistemah. Tekhnicheskie trebovaniya i metody ispytaniy* (Surge Protective Devices Connected to Low-Voltage Power Distribution Systems. Technical Requirements and Test Methods). M.: Standartinform, 2012, 55 p.
7. **GOST 15163-96.** *Elektrooborudovanie peremennogo toka na napryazheniya ot 1 do 750 kV. Trebovaniya k elektricheskoy proch-nosti izolyatsii* (Electrical Equipment for A.C. Voltages from 1 to 750 kV. Requirements for Dielectric Strength of Insulation). Minsk: Mezhsudarstvennyy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii, 1998, 50 p.
8. **GOST IEC 61643-11-2013.** *Ustroystva zashchity ot perenapryazheniy nizkovol'tnye. Chast' 11. Ustroystva zashchity ot perenapryazheniy, podsoedinnennye k nizkovol'tnym sistemam raspredeleniya elektroenergii. Trebovaniya i metody ispytaniy* (Low-voltage Surge Protective Devices. Part 11. Surge Protective Devices Connected to Low-Voltage Power Systems. Requirements and Test Methods). M.: Standartinform, 2015, 76 p.
9. **JSC "Hakel"** Website [Electron. resource], URL: <https://www.hakel.ru> (Date of appeal 27.12.2021).
10. **OBO Bettermann** Website [Electron. resource], URL: <https://www.obocom.ru> (Date of appeal 27.12.2021).
11. **DEHN** Website [Electron. resource], URL: <https://www.dehn.ru.com/ru> (Date of appeal 27.12.2021).
12. **CITEL** Website [Electron. resource], URL: <https://citel.ru/ru> (Date of appeal 27.12.2021).
13. **IEK GROUP** Website [Electron. resource], URL: <https://www.iek.ru/> (Date of appeal 27.12.2021).
14. **ABB** Website [Electron. resource], URL: <https://new.abb.com/products/2CTB815708R0800/ovr-t2-3n-80-275s-p-ts-qs> (Date of appeal 27.12.2021).
15. **Fedorov A.I., Bazelyan E.M.** *Rabota UZIP pri stupenchatoy zashchite* (The work of SPD with Step-by-Step Protection [Electron. resource], URL: <https://docplayer.com/110765733-Rabota-uzip-pri-stupenchatoy-zashchite.html> (Date of appeal 27.12.2021).
16. **Balyuk N.V., et al.** *Tekhnologii elektromagnitnoy sovmestimosti – in Russ.* (Electromagnetic Compatibility Technologies), 2021, No. 2 (77), pp. 3–19.
17. **RVU** Website [Electron. resource], URL: <http://vei-avis.ru/> (Date of appeal 27.12.2021).
18. **Sidorov V.A., et al.** *Elektrichestvo. – in Russ. (Electricity)*, 2018, No. 4, pp. 4–14.
19. **LME-Opn** Website [Electron. resource], URL: <http://www.lme-opn.ru/> (Date of appeal 27.12.2021).

[10.11.2021]