

# Комбинированные устройства защиты электротехнического оборудования для силовых электрических сетей на классы напряжений 10кВ, 6кВ и 0,4кВ

Н.Н.Швец<sup>1,3</sup>, Н.М.Лепёхин<sup>1</sup>, В.П.Мирошниченко<sup>1</sup>, А.И.Орлов<sup>1</sup>, В.С.Сысоев<sup>1</sup>, И.В. Дубов<sup>1</sup>,  
Е.В. Басов<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> РФЯЦ-ВНИИТФ, Истра, Россия,

<sup>2</sup> ВЭИ - филиал РФЯЦ-ВНИИТФ, Москва, Россия,

<sup>3</sup> МГИМО Университет МИД России, Москва, Россия

Проблема обеспечения устойчивости работы электротехнических устройств в условиях сложной электромагнитной обстановки является актуальной [1]. При этом существует необходимость определения коммутационных характеристик устройств защиты от импульсных перенапряжений (далее УЗИП), которые предназначены для защиты электрооборудования в воздушных и кабельных сетях переменного тока при деструктивных воздействиях импульсных перенапряжений большой энергии.

Приводится краткое описание конструкции и результаты экспериментальных исследований УЗИП [2,3] в сейсмостойком конструктивном исполнении (с повышенной механической прочностью), разработанных на основе комбинированного использования оксидно-цинковых нелинейных резисторов (варисторов) и управляемых вакуумных разрядников, в которых защита от импульсных перенапряжений выполняется при срабатывании элементов как коммутирующего типа, так и элементов ограничивающего типа, которые могут как коммутировать, так и ограничивать напряжение, а также выполнять обе функции. Разработанные УЗИП предназначены для трехфазных воздушных и кабельных линий электропередач силовых электрических сетей электроснабжения (СЭС) специальных фортификационных сооружений (СФС) на классы напряжений 10кВ, 6кВ и 0,4кВ частотой 50/60Гц.

Результаты экспериментальных исследований коммутационных характеристик приводятся для УЗИП следующих типов:

- УЗИП 3 – 10 – 50 (на класс напряжения 10кВ, с остаточным напряжением  $U_{res}$ , не более 40 кВ);

- УЗИП 3 – 6 – 50 (на класс напряжения 6кВ, с остаточным напряжением  $U_{res}$ , не более 30 кВ);

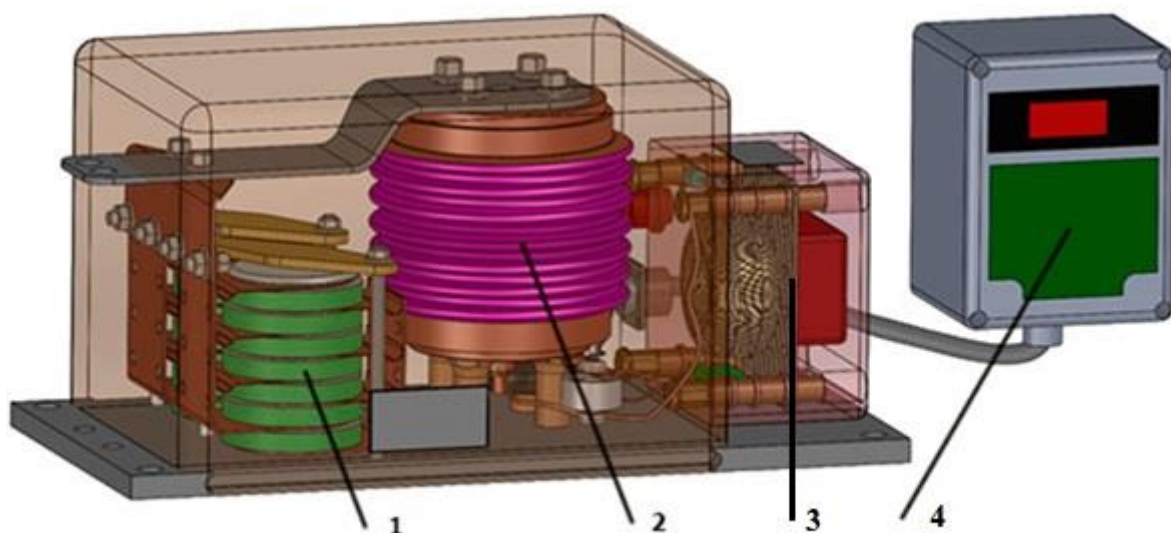
- УЗИП класса защиты 1 – тип 2 (на класс напряжения 0,4кВ, с остаточным напряжением  $U_{res}$ , не более 2,5 кВ);

*Примечание [4]: Остаточное напряжение,  $U_{res}$ , (residual voltage  $U_{res}$ )- это пиковое значение напряжения, появляющееся на выводах УЗИП, вследствие прохождения разрядного тока;*

Исследования коммутационных характеристик УЗИП 3 – 10 – 50 и УЗИП 3 – 6 – 50 проводились при воздействии предельных (50кА) разрядных токов молнии формой 8/20мкс, пропускаемых каждым полюсом защитного устройства, и при воздействии максимальных (однократных) разрядных токов ЭМИ амплитудой 50 кА формой 10/5000мкс. Исследования коммутационных характеристик УЗИП класса защиты 1 – тип 2 проводились при воздействии номинальных (амплитудой 75кА) разрядных токов молнии формой 8/20мкс, пропускаемых каждым полюсом защитного устройства, и номинальных (многократных) разрядных токах ЭМИ амплитудой 50кА формой 10/5000мкс. Исследования коммутационных характеристик УЗИП проводились с контролем *измеренного предельного напряжения* (measured limiting voltage -  $U_{mlv}$ ), т.е. максимальных значений напряжений, которые измеряются на выводах УЗИП при подаче импульсов заданной формы волны и амплитуды [4].

**Устройство УЗИП комбинированного типа.** Разработанные, в соответствии с [2,3], защитные устройства комбинированного типа: УЗИП 3 – 10 – 50, УЗИП 3 – 6 – 50 и УЗИП класса защиты 1 – тип 2 состоят из 3-х однофазных устройств защиты от импульсных перенапряжений полюсов (модулей) УЗИП. При этом следует отметить унификацию изделий среднего (6кВ и 10 кВ) напряжений и изделий низкого (0,4кВ) напряжения.

Для иллюстрации конструкций УЗИП комбинированного типа на Рисунок 1 представлен общий вид полюса УЗИП класса защиты 1 – тип 2.



*Рисунок 1 – Общий вид полюса УЗИП класса защиты 1 – тип 2, где: 1- блок нелинейных резисторов (варисторов), 2 - разрядник вакуумный управляемый (РВУ), 3 - блок запуска (поджига), 4 – блок индикации*

В конструкциях всех защитных устройств (УЗИП 3 – 10 – 50, УЗИП 3 – 6 – 50 и УЗИП класса защиты 1 – тип 2) в каждом модуле (полюсе) УЗИП имеется блок ограничения, в котором объединены блок нелинейных резисторов (варисторов) и разрядник вакуумный управляемый (РВУ), блок запуска (поджига) и блок индикации. Основанием блока ограничения, который в собранном виде залит для обеспечения повышенной механической прочности электроизоляционным компаундом, служит металлическая плита с четырьмя отверстиями для механического болтового крепления модулей УЗИП и соединения к клемме «земля». Для трехфазной сети три полюса (модуля) УЗИП установлены на общем металлическом основании, которое заземлено. Блок ограничения содержит также входную шину для подключения к одной из фаз сети (А, В, или С).

Используемые в разработках УЗИП резисторы (варисторы) представляют собой диски с металлизированными торцевыми поверхностями. Практическая реализация защитных устройств выполнена с использованием:

- ограничителей перенапряжений нелинейных [5] типов ОПН-КС-10/10,5- УХЛ2 и ОПН-Н-0,4/0,45 – 02 Исп.1Д (для УЗИП 3 – 10 – 50);

- ограничителей перенапряжений нелинейных типов: ОПН-КС-6/6,6 - УХЛ2 и ОПН-Н-0,4/0,45 – 02 Исп.1Д (для УЗИП 3 – 6 – 50);

- оксидно-цинковых резисторов (варисторов) [5] типов: ВМС 58 - 4 -3 УХЛ4 и ВМС 58 - 8 – 2 УХЛ4, для УЗИП класса защиты 1 – тип 2.

Используемые в разработках УЗИП разрядники вакуумные управляемые (РВУ) [6] способны работать в широком диапазоне напряжений (0,5-80 кВ) и импульсных токов (0,1-300 кА) при временах включения от 1,0мкс до 1,5мкс. Во включенном состоянии падение напряжения на РВУ в силовом режиме (десятки кА и более) составляет 50-100В, при этом РВУ способны многократно (до  $10^5$  срабатываний) коммутировать сравнительно короткие (от единиц до десятков микросекунд) импульсы тока с протекающим количеством электричества в импульсе до 100Кл при напряжении до 80кВ.

В разработанных УЗИП применены разрядники вакуумные управляемые типов: РВУ-43-1 УХЛЗ (для УЗИП 3 – 10 – 50 и УЗИП 3 – 6 – 50), а также РВУ-27-УХЛЗ, для УЗИП класса защиты 1 – тип 2.

### Тактико-технические характеристики

Тактико-технические характеристики УЗИП 3 – 10 – 50 и УЗИП 3 – 6 – 50 приведены в таблице 1.

Таблица 1

| Наименование параметра  | Количественные значения параметров |                       |
|---|------------------------------------|-----------------------|
|   | УЗИП 3-6-50                        | УЗИП 3-10- 50         |
| Номинальное рабочее напряжение $U_o$ , кВ   | 6                                  | 10                    |
| Наибольшее длительное рабочее напряжение $U_c$ (действующее значение), кВ   | 7,5                                | 12,5                  |
| Ток утечки, мА  | 12                                 | 12                    |
| Остаточное напряжение $U_{res}$ на УЗИП (при импульсе тока молнии формой 8/20 мкс с амплитудой 50 кА), кВ, не более | 27                                 | 35                    |
| Сопротивление изоляции при нормальных климатических условиях, МОм, не менее   | 100                                | 100                   |
| Принцип действия  | Комбинированного типа              | Комбинированного типа |
| Число полюсов   | три                                | три                   |

Тактико-технические характеристики УЗИП класса защиты 1 – тип 2 приведены в таблице 2.

Таблица 2

| Наименование параметров  | Количественные значения параметров |
|--|------------------------------------|
| Номинальное рабочее напряжение $U_o$ на УЗИП, кВ, не более   | 0,22/0,38                          |
| Максимальное длительное рабочее напряжение, $U_c$ , кВ, не более   | 0,24/0,42                          |
| Остаточное напряжение $U_{res}$ , (пиковое значение напряжения, появляющееся на выводах УЗИП, вследствие прохождения разрядного тока) кВ, не более | 2,5                                |
| Сопротивление изоляции цепи «фаза- земля», МОм, не менее   | 100                                |

| Наименование параметров | Количественные значения параметров |
|-------------------------|------------------------------------|
| Принцип действия        | Комбинированного типа              |
| Число полюсов           | три                                |

### Результаты экспериментальных исследований

Разработанные опытные образцы УЗИП испытывались в подразделении ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ имени академика Е.И. Забабахина» Высоковольтный научно-исследовательский Центр (ВНИЦ) 900 на установке типа ГИТ -50/5М, входящей в состав «Уникальной научной установки «Комплексный высоковольтный стенд» [7], далее УНУ КВС. Испытаниям подвергались: УЗИП 3–10 – 50, УЗИП 3–6 – 50 и УЗИП класса защиты 1 - тип 2.

При проведении испытаний, в УНУ КВС генератор ГИТ 50/5-М настраивался на требуемую для проведения испытаний форму и амплитуду импульсов тока с помощью разрядных резисторов. 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 P6015 (ДН-40) с коэффициентом деления 1/1000. Регистрирующая аппаратура была экранирована.

При проведении испытаний проводилась регистрация формы и максимального значения тока, протекающего через каждый полюс УЗИП, а также форма и значения предельного (остаточного) напряжения. Погрешность измерения максимальных значений токов и напряжений не превышала 5%, а погрешность измерения формы импульсов тока и напряжения не превышала 15%. Регистрация напряжения и тока производилась двухканальным осциллографом с полосой пропускания не хуже 200 МГц типа Tektronix TDS 2024.

Разработанные УЗИП 3 – 10 – 50 и УЗИП 3 – 6 – 50 подвергались экспериментальным исследованиям коммутационных характеристик каждого полюса:

- при воздействии максимальных (однократных) разрядных токов молнии ( $I_{\max}$ ) формой 8/20мкс амплитудой 50 кА;
- при воздействии максимальных (однократных) разрядных токов ЭМИ ( $I_{\max\text{ЭМИ}}$ ) формой 10/5000мкс амплитудой 50 кА.

УЗИП класса защиты 1 - тип 2 подвергались экспериментальным исследованиям коммутационных характеристик каждого полюса:

- при воздействии номинальных ( $I_n$ ) разрядных токов молнии формой 8/20мкс амплитудой 75 кА;

- при воздействии номинальных (многократных) разрядных токов ЭМИ ( $I_{нЭМИ}$ ) формой 10/5000мкс амплитудой 50 кА.

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

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

Результаты испытаний и измерений, сведены в таблицу 3.

Таблица 3

| Наименование параметра, размерность  | Фаза ЗУ | Защитное устройство (ЗУ) |             |                              |
|--|---------|--------------------------|-------------|------------------------------|
|  |         | УЗИП 3–10–50             | УЗИП 3–6–50 | УЗИП класса защиты 1 - тип 2 |
| Измеренное предельное напряжение ( $U_{mlv}$ ) /<br>Измеренная амплитуда номинальных ( $I_n$ )<br>разрядных токов молнии формой <b>8/20</b> мкс,<br>$U_{mlv} / I_n$                        | А       | -                        | -           | 1,80кВ/ 75кА                 |
|  | В       | -                        | -           | 1,85кВ/ 80кА                 |
|  | С       | -                        | -           | 1,94кВ/ 84кА                 |
| Измеренное предельное напряжение ( $U_{mlv}$ ) /<br>Измеренная амплитуда максимального ( $I_{max}$ )<br>разрядного тока молнии формой <b>8/20</b> мкс,<br>$U_{mlv} / I_{max}$              | А       | 35кВ/ 50кА               | 27кВ/ 50кА  | -                            |
|  | В       | 35кВ/ 50кА               | 27кВ/ 51кА  | -                            |
|  | С       | 34кВ/ 51кА               | 25кВ/ 50кА  | -                            |
| Измеренное предельное напряжение ( $U_{mlv}$ ) /<br>Измеренная амплитуда номинальных<br>(многократных) разрядных токов ЭМИ ( $I_{нЭМИ}$ )<br>формой <b>10/5000</b> мкс, $U_{mlv}/I_{нЭМИ}$ | А       | -                        | -           | 1,48кВ/ 51кА                 |
|  | В       | -                        | -           | 1,45кВ/ 50кА                 |
|  | С       | -                        | -           | 1,47кВ/ 50кА                 |
| Измеренное предельное напряжение ( $U_{mlv}$ ) /<br>Измеренный максимальный (однократный)<br>разрядный ток ЭМИ ( $I_{maxЭМИ}$ ) формой <b>10/5000</b><br>мкс, $U_{mlv}/I_{maxЭМИ}$         | А       | 40кВ/50кА                | 30кВ/ 50кА  | -                            |
|  | В       | 39кВ/50кА                | 30кВ/ 51кА  | -                            |
|  | С       | 40кВ/51кА                | 29кВ/ 50кА  | -                            |
| Измеренное предельное напряжение ( $U_{mlv}$ ) /<br>Измеренная амплитуда импульсного тока, ( $I_{imp75}$ )<br>формой <b>10/350</b> мкс, $U_{mlv} / I_{imp75}$                              | А       | -                        | -           | 1,52кВ/75кА                  |
|  | В       | -                        | -           | 1,60кВ/77кА                  |
|  | С       | -                        | -           | 1,60кВ/77кА                  |

Ниже, для иллюстрации части выполненных испытаний и измерений, представлены Рисунок 3 и Рисунок 4.

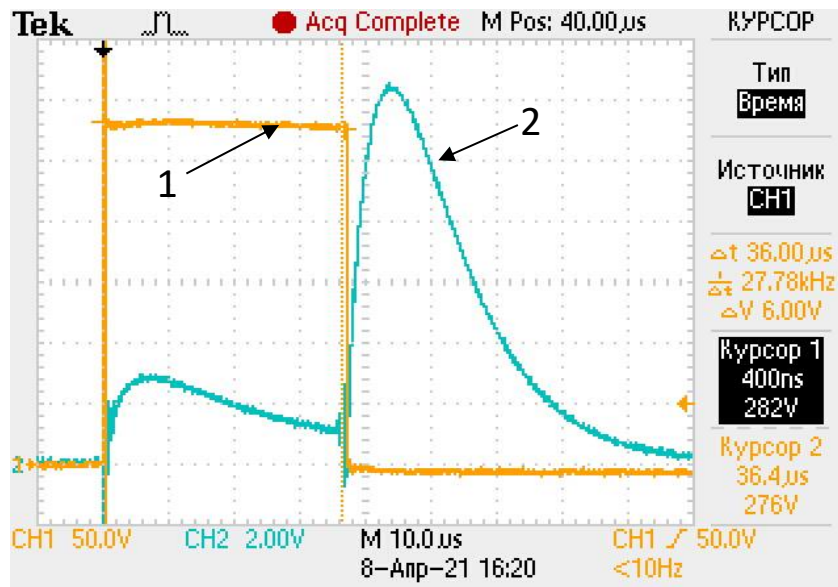


Рисунок 3 – Осциллограммы импульсов тока и напряжения при воздействии на УЗИП 3–10–50 максимального ( $I_{max}$ ) разрядного тока молнии формой 8/20мкс, где: 1- напряжение,  $t_u=5кВ/дел.$ ; 2-ток,  $t_i=8кА/дел.$ ;  $t_f=10мкс/дел.$ ;  $I_{max}\sim 50кА$ ;  $U_{mlv}=28кВ$ .

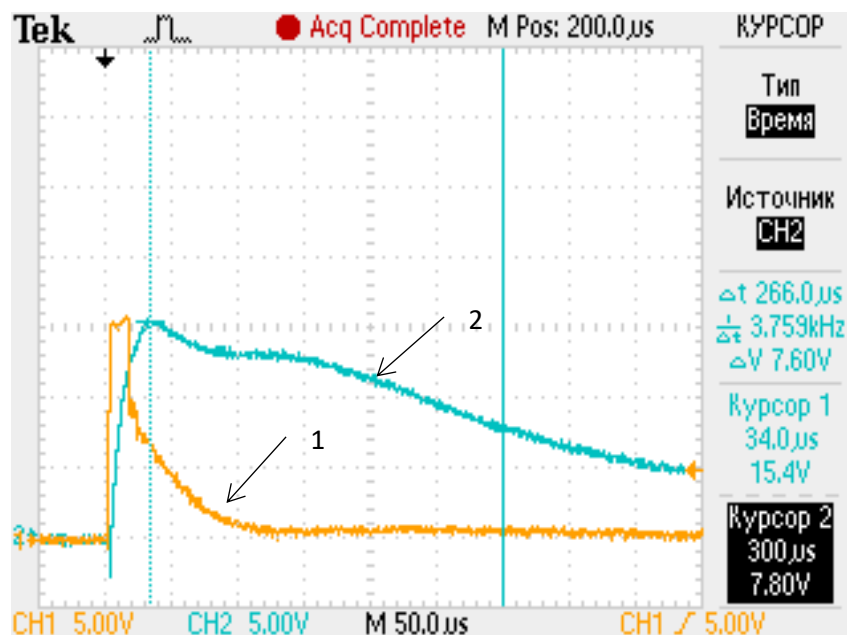


Рисунок 4 - Осциллограммы импульсов тока и напряжения при последовательной подаче на УЗИП класса защиты 1 - тип 2 двух импульсов тока формой 10/350мкс амплитудой не менее 75кА ( $I_{imp75}$ ), где: 1-напряжение,  $t_u = 0,5кВ/дел.$ ; 2-ток,  $t_i=25кА/дел.$ ;  $t_f = 50мкс/дел.$ ;  $I_{max}=75 кА$ ,  $U_{mlv}=1520В$ .

Из осциллограмм (рис. 3) следует, что УЗИП 3 – 10 – 50 успешно выдерживает испытания импульсным током молнии формой 8/20мкс, когда при токе молнии, протекающего через РВУ с амплитудой  $I_{\max} = 49,6\text{кА}$ , время срабатывания оксидно-цинковых нелинейных резисторов (варисторов) составляет  $\sim 36\text{мкс}$ , при этом  $U_{\text{mlv}} = 28\text{кВ}$ . На Рисунке 4 представлены осциллограммы импульсов тока и напряжения при последовательной подаче на УЗИП класса защиты 1 - тип 2 двух импульсов тока формой 10/350мкс амплитудой не менее  $75\text{кА}$  ( $I_{\text{imp}75}$ ) с интервалом менее 5 минут. Откуда следует, что УЗИП успешно выдерживает испытания импульсным током молнии формой 10/350мкс амплитудой  $I_{\max} = 75\text{кА}$ , при этом  $U_{\text{mlv}} = 1520\text{В}$ .

После окончания испытаний УЗИП 3 – 10 – 50, УЗИП 3 – 6 – 50 и УЗИП класса защиты 1 - тип 2 проводилось измерение токов утечки в каждом полюсе разработанных УЗИП относительно корпуса при напряжении переменного тока 220 В, частотой 50 Гц. Величины измеренных токов утечки УЗИП 3 – 10 – 50, УЗИП 3 – 6 – 50 не превысили значений 11мА. Величины измеренных токов утечки УЗИП класса защиты 1 - тип 2 не превысили значений 4,8мА. Значения токов утечки, после проведения испытаний опытных образцов УЗИП класса защиты 1 - тип 2 на импульсный ток формой 10/350мкс при последовательной подаче на каждый модуль импульсов тока амплитудой не менее  $75\text{кА}$ , не превысили 4,6мА.

### **Заключение**

1. На испытательной установке УНУ КВС проведены экспериментальные исследования коммутационных характеристик УЗИП 3 – 10 – 50, УЗИП 3 – 6 – 50 и УЗИП класса защиты 1 - тип 2 с измерением предельных напряжений ( $U_{\text{mlv}}$ ) на выводах УЗИП.
2. Основными конструктивными и технико-эксплуатационными показателями УЗИП 3 – 10 – 50, УЗИП 3 – 6 – 50 и УЗИП класса защиты 1 - тип 2 являются высокая энергоемкость.
3. Экспериментальные исследования показывают, что, с учетом простоты схемных решений, разработанные опытные образцы УЗИП в условиях воздействия электромагнитного импульса высотного ядерного взрыва, целесообразно использовать как в современных СЭС СФС, так и в воздушных и кабельных силовых распределительных электрических сетях на классы напряжений 10кВ, 6кВ и 0,4кВ переменного тока частотой 50/60Гц для защиты электротехнического оборудования **объектов гражданского назначения.**



## Список литературы

1. Швец Н.Н., Орлов А.И., Сысоев В.С., Лепёхин Н.М., Басов Е.В. Об энергетической безопасности России в условиях воздействия электромагнитного импульса высотного ядерного взрыва // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. - 2020. – Т. 16, №11. – С. 2036 – 2059.<https://doi.org/10.24891/ni.16.11.2036>
2. Лепёхин Н.М., Ловенецкая О.В., Мельников А.В. и др. Устройство защиты от импульсных перенапряжений. RU 194140 U1, МПК H02H 9/06. Опубликовано: 29.11.2019. Бюл.№34.
3. Лепёхин Н.М., Мирошниченко В.П., Перунов А.А. и др. Устройство защиты от импульсных перенапряжений. RU 2459333 C1, МПК H02H 9/00. Опубликовано: 20.08.2012. Бюл.№23.
- 4.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».
5. Интернет-ресурс: <http://www.lme-opn.ru/> (дата обращения 24.01.2022).
6. Интернет-ресурс: <http://vei-avis.ru/> (дата обращения 24.01.2022).
7. <https://ckp-rf.ru/usu/73578/>

## Авторы:

Швец Николай Николаевич – советник директора, доктор экономических наук, ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно – исследовательский институт технической физики им. академ. Е.И. Забабахина» (РФЯЦ-ВНИИТФ), г.Истра, Россия, тел.: 8(910)440-70-38

Лепёхин Николай Михайлович – начальник отдела, кандидат технических наук, ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно – исследовательский институт технической физики им. академ. Е.И. Забабахина» (РФЯЦ-ВНИИТФ), г. Истра, Россия, тел.: 8(910)440-70-38, email: n.m.lepehin@vniitf.ru

Мирошниченко Валерий Петрович – ведущий научный сотрудник, ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно – исследовательский институт технической физики им. академ. Е.И. Забабахина» (РФЯЦ-ВНИИТФ), г.Истра, Россия, тел.: 8(903)571-03-58 , email: vpmirosh@mail.ru

Орлов Александр Иванович – научный сотрудник, кандидат технических наук, ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно – исследовательский институт технической физики им. академ. Е.И. Забабахина» (РФЯЦ-ВНИИТФ), г. Истра, Россия, тел.: 8 963 993 4772

Сысоев Владимир Степанович – начальник группы, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно – исследовательский институт технической физики им. академ. Е.И. Забабахина» (РФЯЦ-ВНИИТФ), г. Истра, Россия, тел.: 8(903)1546651, email: v.s.sysoev@vniitf.ru.

Дубов Игорь Владимирович – инженер, ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно – исследовательский институт технической физики им. академ. Е.И. Забабахина» (РФЯЦ-ВНИИТФ), г. Истра, Россия, тел.: 8(905)755-33-23, e-mail: [duboviv@gmail.com](mailto:duboviv@gmail.com)

Басов Евгений Валерьевич – главный специалист, кандидат технических наук, Всероссийский электротехнический институт (ВЭИ) – филиал ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно – исследовательский институт технической физики им. академ. Е.И. Забабахина» (ВЭИ - филиал РФЯЦ-ВНИИТФ), г. Москва, Россия, тел.: 8 9654137077