

Комбинированное устройство защиты электротехнического оборудования от импульсных перенапряжений¹

АЛФЕРОВ Д.Ф., ИВАНОВ В.П., МИРОШНИЧЕНКО В.П., ПЕРУНОВ А.А.,
ПРИСЕКО Ю.С., СИДОРОВ В.А., ФИЛИППОВ В.Г.

Предложена схема автоматического устройства защиты электрооборудования от импульсных перенапряжений на основе комбинации нелинейных резисторов и вакуумного управляемого разрядника (РВУ). Время срабатывания и уровень ограничения напряжения определяются параметрами нелинейного сопротивления. Высокая коммутационная способность защитного устройства обеспечивается способностью РВУ многократно пропускать токи амплитудой до десятков килоампер при длительности импульса до десятка миллисекунд. Приводятся результаты испытаний коммутационных характеристик такого устройства.

Ключевые слова: электротехническое оборудование, импульсные перенапряжения, автоматические устройства защиты, нелинейные резисторы, вакуумные управляемые разрядники

Надежная работа электротехнического оборудования обеспечивается при условии ограничения электрических воздействий на это оборудование до безопасного уровня. Одним из опасных видов таких воздействий являются импульсные перенапряжения, возникающие при грозовом импульсе или мощном электромагнитном излучении.

Для защиты от перенапряжений обычно применяются шунтирующие быстродействующие устройства, в качестве которых используются газонаполненные защитные разрядники [1]. Однако искровые промежутки разрядников имеют значительное время деионизации и большие потери при пропускании разрядного тока. Кроме того, они не способны длительно (более 100 мкс) пропускать аварийный ток. Данное обстоятельство ограничивает срок службы разрядников и затягивает время подключе-

The schematic design of an automatic device for protection from impulse overvoltages made as a combination of nonlinear resistors and a controlled vacuum surge arrester is proposed. The operation time and voltage limitation level are determined by the parameters of the nonlinear resistor. High switching capacity of the protective device is achieved owing to the ability of the controlled vacuum surge arrester to pass currents with amplitude as high as several tens of kiloamperes with a pulse duration of up to ten milliseconds for many times. Results from tests of the switching characteristics of such device are presented.

Key words: electrical equipment, impulse overvoltages, automatic protective devices, nonlinear resistors, controlled vacuum surge arresters

ния оборудования к источнику после завершения аварийного режима. Недостатком разрядников также является значительный разброс пробивных напряжений искровых промежутков и сравнительно большие значения остающегося напряжения.

В последнее время наряду с защитными разрядниками все более широкое применение находят ограничители перенапряжений (ОПН) без искровых промежутков. В качестве активного элемента в них используются новые нелинейные резисторы на основе окиси цинка, имеющие нелинейную вольт-амперную характеристику [1]. Однако для длительного ограничения перенапряжения с большими амплитудами сопровождающего тока ОПН приходится составлять из большого числа параллельно-последовательно соединенных элементов, что приводит к увеличению тока утечки, усложнению конструкции, увеличению габаритов ОПН и, соответственно, к их высокой стоимости.

Другим перспективным способом защиты от перенапряжений и токовой перегрузки электротехни-

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №09-08-00368-а).

Авторы: Ларин Василий Серафимович окончил электроэнергетический факультет (ЭЭФ) Московского энергетического института (МЭИ (ТУ)) в 2004 г. В 2007 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и разработка эффективного метода расчета внутренней изоляции силовых трансформаторов». Ведущий научный сотрудник ФГУП ВЭИ.

Лоханин Андрей Константинович окончил ЭЭФ МЭИ в 1958 г. В 1995 г. защитил докторскую диссертацию «Вопросы координации изоляции силовых трансформаторов для передач переменного и постоянного тока сверхвысокого напряжения» в ВЭИ. Скончался в 2011 г.

Шейко Павел Антонович окончил ЭЭФ МЭИ в 1966 г. Технический консультант корпорации «Союз».

ческого оборудования является использование быстросрабатывающего защитного устройства на основе управляемых вакуумных разрядников (РВУ).

Такой разрядник представляет собой безнакальный трехэлектродный герметизированный прибор с давлением остаточных газов (не более 10^{-4} Па). Основным элементом РВУ является электродная система, содержащая два основных и один управляющий электроды. Электродная система размещается в герметизированном корпусе, который выполняет также функции изолятора. Управляющий электрод устанавливается на одном из основных электродов и отделяется от него диэлектрической вставкой (комбинация управляющего электрода с диэлектрической вставкой называется узлом запуска). Расстояние между основными электродами всегда фиксировано и определяется требуемой электрической прочностью вакуумного промежутка. Разрядник содержит также экранную систему, которая защищает внутренние стенки корпуса от металлизации продуктами эрозии основных электродов.

Интерес к РВУ обусловлен такими его преимуществами по сравнению с другими типами коммутирующих устройств, как способность работать в широком диапазоне рабочих напряжений и токов без изменения времени включения, высокой стойкостью к аварийным воздействиям и сравнительно низкой стоимостью.

Включение РВУ осуществляется подачей пускового импульса напряжения на управляющий электрод. Этот импульс вызывает пробой по поверхности диэлектрической вставки между управляющим и основным электродами и генерацию инициирующего искрового разряда. Плазма искрового разряда быстро заполняет основной вакуумный промежуток, разряд переходит из искровой стадии в дуговую, и разрядник включается.

Время заполнения вакуумного промежутка d плазмой инициирующего разряда является основной составляющей времени включения $t_{\text{вкл}}$ вакуумного промежутка. Время $t_{\text{вкл}}$ уменьшается с увеличением тока запуска I_t и стремится к минимальному значению $t_{\text{вкл}} \approx d/V_i$, где V_i – скорость ионов плазменного потока. В высоковольтных РВУ с размером вакуумного промежутка $d \geq 10$ мм минимальное время включения $t_{\text{вкл}} \geq 1$ мкс. Для уменьшения уровня рассеиваемой энергии в разряде оптимальную длительность импульса $t_{\text{И}}$ тока запуска следует выбирать из соотношения $t_{\text{И}} \geq t_{\text{вкл}}$. Плазма вакуумной дуги способна пропускать большие токи между основными электродами без их существенного разрушения. Горение вакуумной дуги завершается при приближении тока к нулю, и вакуумная дуга гаснет. Благодаря быстрой деионизации плазмы и

конденсации металлического пара на электродах вакуумный промежуток имеет высокую скорость восстановления электрической прочности.

В ВЭИ работа по разработке РВУ была начата в 80-е годы прошлого столетия. К настоящему времени разработано несколько типов РВУ, предназначенных для коммутации мощных емкостных накопителей энергии в электрофизических установках, а также для электроразрядных и магнитно-импульсных технологий [2, 3]. Многолетний опыт эксплуатации РВУ показал, что они способны работать в широком диапазоне импульсных напряжений (1–50 кВ) и токов (0,1–300 кА). Во включенном состоянии падение напряжения на РВУ составляет 50–100 В, что позволяет существенно снизить уровень рассеиваемой энергии в разряднике при коммутации больших токов.

Один из возможных вариантов защитного устройства на основе комбинации РВУ и ОПН предложен в [4]. Устройство содержит РВУ, соединенный последовательно с демпфирующим сопротивлением, которое состоит из параллельно соединенных нелинейного (ОПН) и линейного сопротивлений. Разрядник включается с помощью блока запуска, который после подачи управляющего импульса подает на управляющий электрод импульс запуска с заданными параметрами напряжения и тока. Такое устройство способно ограничивать перенапряжения с большими амплитудами сопровождающего тока и большой длительности. Защитный уровень ОПН может быть близким к номинальному напряжению сети. В результате рассеиваемая в ОПН энергия будет существенно меньше, чем в схеме его подключения без РВУ. Параллельное соединение нелинейного и линейного сопротивлений также позволит уменьшить выделяемую в нелинейном сопротивлении энергию. Однако наличие блока запуска в таком устройстве ограничивает минимальное время его срабатывания на уровне 10–15 мкс. Кроме того, требуется время с момента возникновения перенапряжения и на формирование импульса управления на блок запуска.

Другой вариант шунтирующего защитного устройства на основе РВУ без блока запуска рассмотрен в [5]. Это устройство включается схемой запуска автоматически при превышении допустимого уровня напряжения. Схема запуска подсоединена параллельно РВУ и состоит из последовательно соединенных ОПН и линейного сопротивления. К месту их соединения подсоединен управляющий электрод РВУ. В такой схеме импульс напряжения запуска формируется при открытии ОПН. Параметры импульса тока запуска определяются током сопровождения ОПН и проводимостью вакуумного промежутка в начальной стадии разряда при вклю-

чении РВУ. Однако применение такого устройства для защиты от импульсных перенапряжений с крутизной фронта $dU/dt > 10$ кВ/мкс ограничено из-за конечного времени включения высоковольтных РВУ (не менее 1 мкс).

В статье предложена схема автоматического комбинированного устройства защиты с временем срабатывания менее 1 мкс. Устройство способно ограничить импульс перенапряжения с крутизной фронта $dU/dt > 10$ кВ/мкс и пропускать ток 50 кА длительностью 10 мс. Приводятся результаты испытаний коммутационных характеристик такого устройства.

Объект испытаний. Комбинированное устройство защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП) содержит ограничивающий и коммутационный модули, совместное действие которых определяется как характеристиками перенапряжения, так и временем его воздействия. Принципиальная схема УЗИП представлена на рис. 1. Ограничивающий модуль (рис. 1) состоит из нескольких параллельно соединенных мощных ОПН R_1-R_5 . Этот блок предназначен для уменьшения скорости нарастания $dU_{\text{вх}}/dt$ напряжения импульсного воздействия на защищаемое оборудование и ограничения напряжения до допустимого уровня $U_{\text{огр}}$ в течение времени до 50 мкс.

Уменьшение крутизны фронта воздействующего импульса напряжения осуществляется с помощью фильтра наносекундных импульсов, состоящего из дополнительной линейной индуктивности и паразитной электрической емкости блока ОПН, что обеспечивает ограничение перенапряжения до срабатывания ОПН. Ограничители рассеивают энергию перенапряжения до допустимых значений. При превышении длительности перенапряжений по допустимой для ОПН энергии (например 18 ± 20 кДж на один ОПН-КС-6/6,9) срабатывает РВУ и пропускает энергию длительных перенапряжений.

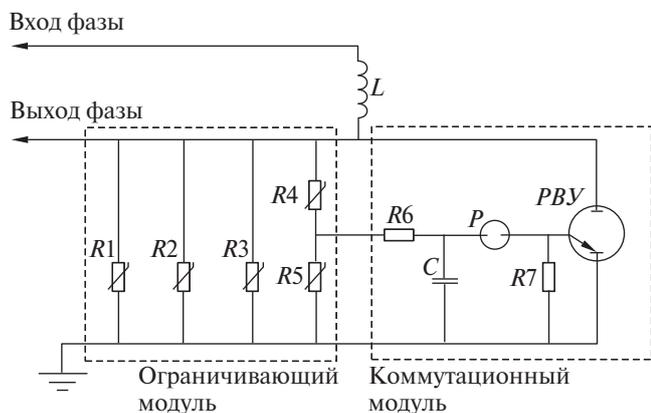


Рис. 1. Принципиальная схема устройства защиты от импульсных перенапряжений

Коммутационный модуль содержит схему запуска и мощный РВУ. На рис. 1 показан упрощенный вариант схемы запуска. Схема состоит из R_4-R_6-C цепочки и разрядника P со стабилизированным пробивным напряжением. Она служит для включения РВУ в заданный момент времени. При возникновении импульса перенапряжения включается ограничивающий элемент R_4 . В результате по цепи R_4-R_6 начинает заряжаться конденсатор C до напряжения $U_C(t)$. При достижении $U_C(t)$ значения пробивного напряжения разрядник P срабатывает. При пробое разрядника P на управляющем электроде РВУ возникает импульс напряжения, который вызывает пробой узла запуска и таким образом включает РВУ. Время включения РВУ Δt_U регулируется постоянной времени R_4-R_6-C цепочки и определяется допустимым уровнем рассеиваемой в ОПН энергии и составляет примерно 50 мкс. Сопротивление R_7 служит для защиты от ложного запуска РВУ.

В соответствии с описанным принципом в ВЭИ был разработан и изготовлен опытный образец УЗИП в трехфазном исполнении на номинальное напряжение 6 кВ и импульсный ток до 50 кА. В качестве ограничителя напряжения использовались высоконелинейные сопротивления ОПН-КС-6/6,9. В коммутационном элементе использовался РВУ-47. Фотография трехфазного устройства показана на рис. 2. Каждая фаза (А, В, С) включает УЗИП, содержащий силовой модуль 1, счетчик импульсов 2, блок диагностики и сигнализации 3 и блок запуска 4.

Схема испытаний. Испытания проводились на испытательном стенде ВНИЦ ВЭИ ГИТ-50/5 собранном по схеме, показанной на рис. 3. В состав ГИТ-50/5 входят генератор импульсных токов и напряжений ГИТ-50 с зарядным напряжением 50 кВ и емкостью 108 мкФ и генератор импульсных

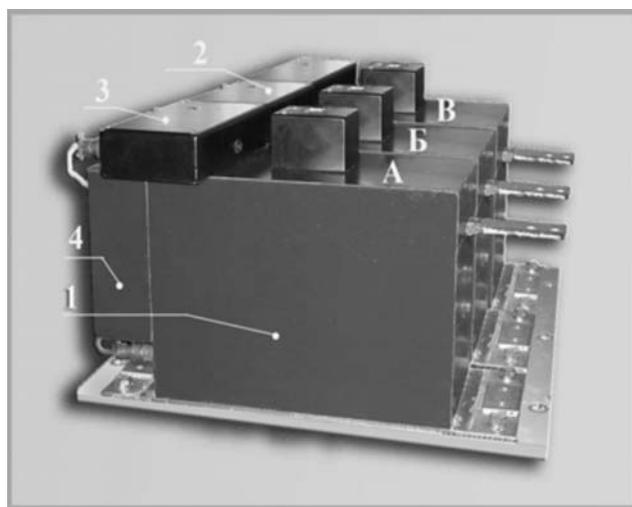


Рис. 2. Опытный образец устройства защиты от импульсных перенапряжений УЗИП

токов и напряжений ГИТ-5 с зарядным напряжением 5 кВ и емкостью 80000 мкФ, которые могут работать как отдельно, так и совместно. Для обеспечения аperiодической формы импульсов тока в разрядные цепи ГИТ-5 включены резисторы. Электрическая развязка генераторов при совместной работе осуществляется диодным модулем, выполненным на диодах Д273-2500-50-УХЛ2.

Было проведено по пять разрядов на УЗИП с регистрацией импульсов тока и напряжения. После подачи пяти импульсов измерялись ток утечки и сопротивление изоляции при действующем напряжении 7,5 кВ (50 Гц). Напряжение измерялось с помощью делителя напряжения Tektronix P6015 (ДН40) с коэффициентом деления 1/1000. Ток измерялся коаксиальным шунтом ШТ-100 с сопротивлением 0,2 мОм. Электрические сигналы регистрировались с помощью осциллографа Tektronix TDS 3032В.

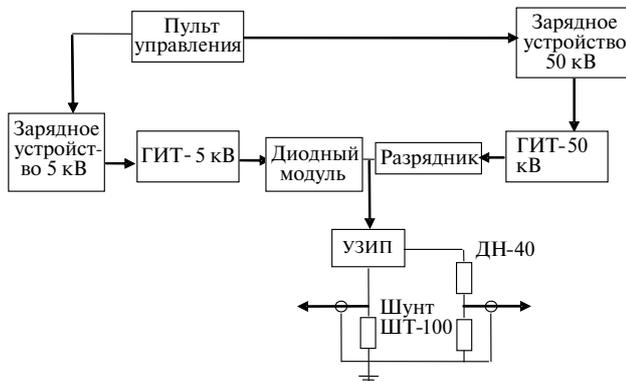


Рис. 3. Схема испытательного стенда

Результаты испытаний. Типичные осциллограммы входного и ограниченного импульсов напряжений представлены на рис. 4,а. Здесь верхний график 1 – импульс напряжения на входе УЗИП с амплитудой $U_{\text{вх}} \approx 40$ кВ, скоростью нарастания $dU_{\text{вх}}/dt \sim 3 \cdot 10^3$ кВ/мкс и длительностью фронта $t_{\text{вх}} \approx 15$ нс. Нижний график 2 – импульс напряжения на выходе УЗИП, ограниченный почти в 2 раза ОПН модулем на уровне $U_{\text{огр}} \leq 25$ кВ. Длительность фронта ограниченного импульса напряжения $t_{\text{фр}} \approx 125$ нс. При этом скорость нарастания напряжения на выходе УЗИП уменьшилась приблизительно в 8 раз. Длительность Δt_U ограниченного импульса напряжения определялась моментом включения РВУ в коммутационном модуле. Этот момент регулировался путем изменения значения сопротивления R_6 . На рис. 4,б представлены осциллограммы импульса напряжения длительностью $\Delta t_U = 20$ мкс.

Во время испытаний схема запуска РВУ была настроена таким образом, чтобы включение коммутационного модуля происходило через 45 мкс после подачи входного импульса напряжения (рис. 5). В нижней части рис. 6 представлены осциллограммы ограниченного напряжения длительностью $\Delta t_U = 45$ мкс и начального участка тока в УЗИП. В течение времени Δt_U ток через УЗИП представлял собой ток сопровождения ОПН, ограниченный на уровне 20–30 кА. Через 45 мкс происходило включение РВУ, который быстро шунтировал ОПН. Ток увеличивался до 50 кА примерно за 7 мкс. В этом случае амплитуда тока определялась только параметрами внешней цепи. Полностью импульс тока показан в верхней части рис. 6. После включения РВУ через УЗИП проходил униполярный импульс тока с фронтом не более 10 мкс и амплитудой $I_m \approx 50$ кА. Скорость нарастания тока di/dt была не менее 5 кА/мкс. Длительность спада импульса тока Δt_i на уровне 0,5 амплитуды была не менее 5 мс. Результаты испытаний каждого блока УЗИП представлены в таблице.

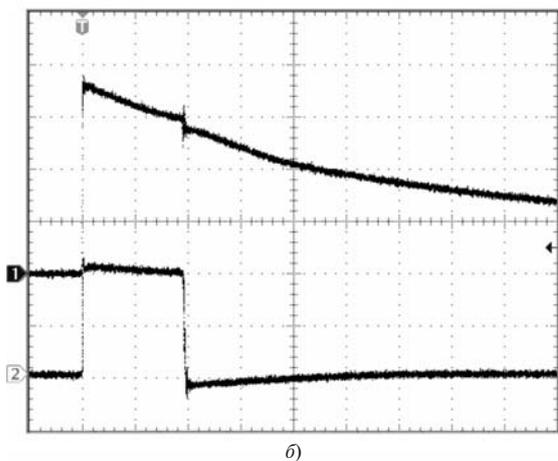
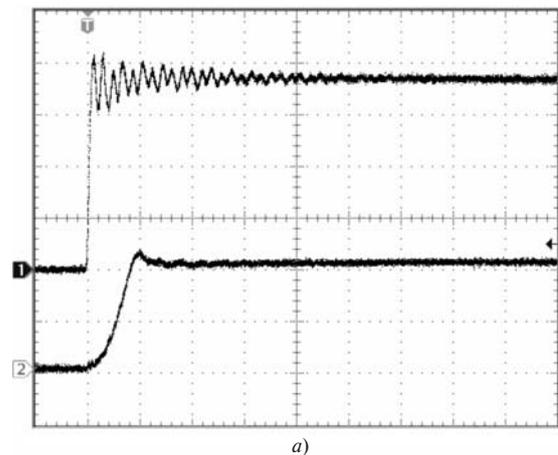


Рис. 4. Осциллограммы импульсов напряжений на входе и выходе УЗИП без включения (а) и при включении (б) коммутационного модуля: 1 – $U_{\text{вх}}$ (10 кВ/дел., 200 нс/дел.); 2 – $U_{\text{огр}}$ (10 кВ/дел., 200 нс/дел.)

Номер им-пульса	Значения параметров тока и напряжения				
	$U_{\text{вх}} / dt$, кВ/мкс	di / dt , кА/мкс	$t_{U_{\text{вх}}}$, мкс	Δt_i , мс	$U_{\text{огр}}$, кВ
1	10,6/10,0/ 10,1	5,7/6,3/6,1	2,2/1,8/2,0	5,10/5,02/ 5,00	24,0/24,5/ 23,5
2	11,4/10,8/ 11,2	6,5/6,5/6,9	2,0/2,0/1,9	5,08/5,00/ 5,08	24,0/24,5/ 24,5
3	10,5/10,5/ 10,2	6,4/6,3/6,0	2,2/1,9/1,8	5,04/5,02/ 5,08	24,0/25,0/ 24,0
4	10,8/10,2/ 10,5	6,8/6,0/6,2	2,0/2,1/1,9	5,00/5,02/ 5,00	24,5/25,0/ 24,0
5	10,4/10,0/ 10,4	6,5/6,4/6,0	1,8/1,9/1,9	5,04/5,06/ 5,08	24,5/25,0/ 24,0

Примечание. Значения параметров указаны для первого, второго и третьего блоков.

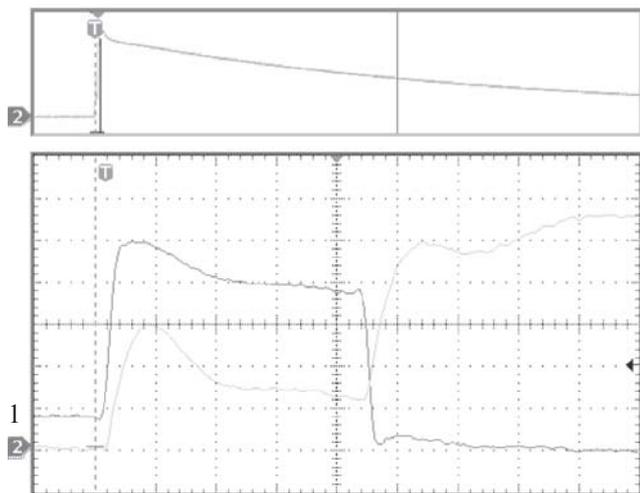


Рис. 5. Осциллограммы импульсов ограниченного напряжения 1 (5 кВ/дел., 10 мкс/дел.) и тока 2 (10 кА/дел., 10 мкс/дел.) в УЗИП при включении коммутационного модуля

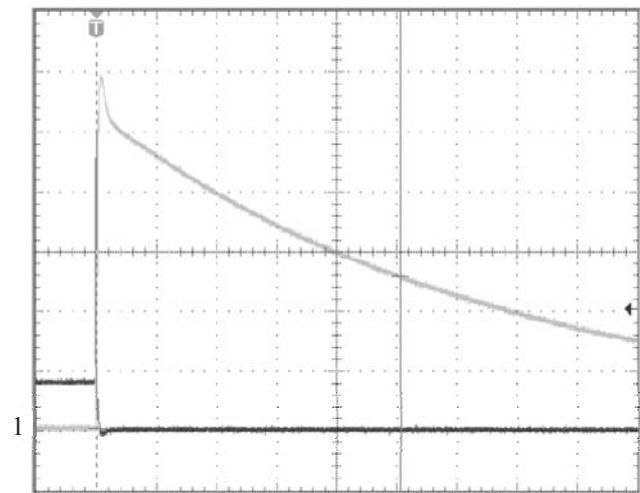


Рис. 6. Осциллограмма импульса тока 1 (10 кА/дел., 1 мс/дел.) с амплитудой $I_m = 54$ кА

Выводы. 1. Испытания экспериментально подтвердили правильность принятых технических решений и работоспособность быстродействующего устройства защиты от импульсных перенапряжений на основе комбинации ОПН и РВУ. Действующее значение тока утечки до и после испытательного было менее 3 мА, сопротивление изоляции – более 3 ГОм.

2. Такое устройство целесообразно использовать в сетях с большим по амплитуде и длительности током сопровождения. Время срабатывания и уровень ограничения напряжения определяются параметрами нелинейного сопротивления. Высокая коммутационная способность защитного устройства обеспечивается способностью РВУ многократно пропускать токи амплитудой до десятков килоампер и длительностью до десятка миллисекунд и восстанавливать электрическую прочность при первом переходе тока через нуль после прохождения сопровождающего тока короткого замыкания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чунихин А.А., Жворонков М.А. Аппараты высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. Алферов Д.Ф., Иванов В.П., Сидоров В.А. Управляемые вакуумные разрядники: основные свойства и применение. – Электро, 2002, № 2.
3. Алферов Д.Ф., Матвеев Н.В., Сидоров В.А., Хабаров Д.А. Применение управляемых вакуумных разрядников в высоковольтном быстродействующем защитном устройстве. – ПТЭ, 2004, № 3.
4. Алферов Д.Ф., Белкин Г.С., Ивакин В.Н. и др. Новые системы защиты электротехнического оборудования от перенапряжений и токовых перегрузок. – Электротехника, 2006, № 9.
5. Алферов Д.Ф., Евсин Д.В., Иванов В.П., Сидоров В.А. Устройство защиты от импульсных перенапряжений на основе вакуумного управляемого разрядника. – ПТЭ, 2011, №1.

Авторы: Алферов Дмитрий Федорович окончил факультет автоматики и телемеханики Московского инженерно-физического института в 1969 г. Докторскую диссертацию «Физико-технические основы создания вакуумных электрических аппаратов для коммутации импульсных и постоянных токов» защитил в ВЭИ в 2010 г. Ведущий научный сотрудник ФГУП ВЭИ.

Иванов Валерий Павлович окончил электроэнергетический факультет МЭИ в 1972 г. Начальник сектора ФГУП ВЭИ.

Мирошниченко Валерий Петрович окончил электроэнергетический факультет Томского политехнического института им. С.М. Кирова в 1972 г. Ведущий научный сотрудник ВНИЦ ВЭИ – филиала ФГУП ВЭИ (г. Истра).

Перунов Анатолий Афанасьевич окончил электроэнергетический факультет Ленинградского политехнического института в 1972 г. В 1983 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка и исследование систем коммутации многоступенчатых генераторов высокого напряжения» в ВЭИ. Начальник

отделения ВНИЦ ВЭИ-филиала ФГУП ВЭИ г. Истра.

Присенко Юрий Степанович окончил Московский энергетический институт, радиотехнический факультет по специальности радиотехника в 1988 г. Начальник отдела ВНИЦ ВЭИ-филиала ФГУП ВЭИ г. Истра

Сидоров Владимир Алексеевич окончил электромеханический факультет МЭИ в 1974 г. В 1990 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и разработка вакуумных управляемых разрядников отпаянной конструкции для импульсных источников энергии» в ВЭИ. Ведущий научный сотрудник Всероссийского электротехнического института (ГУП «ВЭИ»), кандидат техн. наук.

Филиппов Валентин Георгиевич окончил Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, электротехнический факультет в 1972 г. В 1985 г. защитил кандидатскую диссертацию в МЭИ. Первый зам. директора ВНИЦ ВЭИ-филиала ФГУП ВЭИ г. Истра.