

М.И. Баранов

**ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ ВАКУУМНЫХ КОММУТАТОРОВ В СИЛЬНОТОЧНЫХ ЦЕПЯХ МОЩНЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК И СХЕМАХ АВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ СИЛОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ**

*Виконано огляд ряду сучасних закордонних досліджень в області створення і застосування нового покоління керованих і некерованих вакуумних коммутаторів у сильнострумних розрядних колах потужних високовольтних електрофізичних установок для наукових і технологічних цілей, а також у пристроях аварійного захисту силового електроенергетичного устаткування.*

*Выполнен обзор ряда современных зарубежных исследований в области создания и применения нового поколения управляемых и неуправляемых вакуумных коммутаторов в сильноточных разрядных цепях мощных высоковольтных электрофизических установок для научных и технологических целей, а также в устройствах аварийной защиты силового электроэнергетического оборудования.*

**ВВЕДЕНИЕ**

Импульсная энергетика (ИЭ) как новая и развивающаяся подотрасль промышленной энергетики требует постоянного совершенства элементной базы своего мощного высоковольтного электрофизического оборудования [1]. Используемые в ИЭ энергетические установки, базирующиеся пока, в основном, на высоковольтных электрофизических установках (ВЭФУ), в своем составе содержат мощные накопители электрической (магнитной) энергии, которую после их заряда приходится с помощью быстрых сильноточных высоковольтных ключей-коммутаторов передавать в электрическую нагрузку (например, в мощную импульсную электроразрядную лампу накачки квантового генератора высокочастотных электромагнитных колебаний, испускающего при определенных физических условиях интенсивное индуцированное излучение в видимой области спектра) [2-4]. Сейчас подобные ВЭФУ и основанные на них наукоемкие электротехнологии по получению на новых физических принципах мощных источников электрической энергии активно применяются за рубежом (например, в Российской Федерации, США, Италии и в других промышленно развитых странах мира) в исследованиях по импульсному термоядерному синтезу [5, 6].

В этой связи разработка, создание и внедрение в энергетическое оборудование ИЭ новых сильноточных высоковольтных коммутаторов, обладающих повышенной надежностью, долговечностью и стабильностью работы в электрических цепях ВЭФУ является актуальной задачей. Не менее актуальной задачей является сейчас создание для нужд традиционной электроэнергетики и ИЭ быстродействующих защитных устройств, шунтирующих дорогостоящее электрооборудование в аварийных режимах его работы [1]. Известно, что традиционными высоковольтными коммутаторами, используемыми в сильноточных разрядных цепях мощных ВЭФУ и схемах аварийной защиты силового электроэнергетического оборудования, являются следующие управляемые и неуправляемые газоразрядные и твердотельные полупроводниковые физический приборы [6-12]: игнитроны, тиратроны, искровые газовые (вакуумные) разрядники и динисторы различных конструкций. Здесь требуется, во-первых, отметить то обстоятельство, что экологически небезопасные ртутные управляемые разрядники-игнитроны при их относительно высокой коммутационной способности (амплитуда рабочих микросекундных импульсных токов составляет до 100 кА, а величина переносимых зарядов – до 30 Кл) требуют периодической тренировки своих электродных систем и соответственно определенного времени для

их подготовки к работе в составе коммутируемых цепей ВЭФУ и защиты [7, 10]. Во-вторых, воздушные искровые разрядники атмосферного давления при своей относительной простоте конструкции, дешевизне и способности коммутировать микро- и миллисекундные импульсы тока амплитудой до сотен килоампер требуют периодического технического обслуживания из-за активной электрической эрозии своих металлических электродов [7, 13]. Поэтому в настоящее время их недостаточный рабочий ресурс не позволяет весьма широко использовать данный тип коммутаторов в промышленных мощных высоковольтных импульсных энергоустановках. В-третьих, новое поколение газовых управляемых разрядников типа РГУ на импульсное напряжение до 100 кВ, рассчитанных на длительную коммутацию в микросекундном временном диапазоне импульсных токов амплитудой до 100 кА, было ранее на основе [14] вкратце описано автором в [15]. В-четвертых, новые экологически чистые и надежно работающие в высоковольтных цепях мощные разрядники-тиратроны типа ТДИ, характеризующиеся возможностью коммутации микро- и миллисекундных импульсов тока амплитудой до 200 кА, хорошо зарекомендовали себя при работе в составе мощных емкостных накопителей энергии (ЕНЭ) импульсных энергоустановок, предназначенных для исследования импульсных термоядерных реакций, вызываемых раз за разом с определенным временным интервалом в активном веществе внешним излучением от мощных лазеров [15-17]. Заметим, что при коммутации синусоидальных затухающих импульсных токов в разрядных цепях ВЭФУ с ЕНЭ, применяемых при обработке металлов давлением сильным импульсным магнитного поля в режиме "малых" токов (амплитудой меньше 20 кА), у тиратронов серии ТДИ наблюдаются обрывы второй и последующих токовых полуволн [18]. В-пятых, надежную работу в составе указанного мощного электрофизического оборудования показали и твердотельные полупроводниковые коммутаторы нового поколения, созданные в последнее время согласно [6, 19] на основе реверсивно-включаемых динисторов (РВД-коммутаторы) на микро – и субмиллисекундные импульсные токи амплитудой до сотен килоампер и также вкратце описанные в [15]. Прогресс в области традиционной электроэнергетики и ИЭ, создания и технологического применения новых ВЭФУ с ЕНЭ и индуктивными накопителями энергии (ИНЭ) коснулся и мощных управляемых (неуправляемых) вакуумных разрядников. Рассмотрим по материалам российских исследований новое поколение таких коммутаторов, предназначенных для работы с повышенной

надежностью и ресурсом в силовых цепях ВЭФУ и схемах защиты силового электроэнергетического оборудования от воздействия аварийных токов и перенапряжений.

### 1. НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ МОЩНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ ВАКУУМНЫХ КОММУТАТОРОВ

**Применение вакуумных коммутаторов в ВЭФУ.** К настоящему времени в РФ разработаны и успешно применяются в силовых цепях ВЭФУ несколько типов мощных управляемых вакуумных разрядников (РВУ), которые рассчитаны на максимальные импульсные токи микро- и миллисекундной длительности до 500 кА и импульсные напряжения до 50 кВ [20-22]. Данным типом мощных разрядников занимается у нас ВНИИ ВЭИ (г. Истра). РВУ представляет собой высоковольтный безнакальный трехэлектродный герметизированный физический прибор (два основных дисковых электрода из металлокерамического материала Si-Si и один управляющий стальной электрод), давление остаточного газа в котором не превышает  $10^{-4}$  Па [21, 22]. Включение любого РВУ осуществляется подачей высоковольтного пускового импульса напряжения на управляющий электрод от внешнего блока запуска. Особенностью этого типа разрядников является то, что управляющий импульс напряжения вызывает электрический пробой вдоль поверхности размещенной внутри их корпуса диэлектрической вставки узла поджига и последующую за этим генерацию инициирующего искрового разряда. Данный разряд поддерживается катодными пятнами, которые возникают вблизи рабочей поверхности указанной диэлектрической вставки. Эти пятна служат источниками сильно ионизированной "металлической" плазмы, которая благодаря использованной в РВУ электродной системе быстро распространяется в вакуумный зазор разрядника. После заполнения вакуумного промежутка между основными электродами (с рабочим зазором величиной 5 мм) "металлической" плазмой электрический разряд переходит из искровой стадии в дуговую и РВУ полностью "открывается" [22]. В части физики протекающих в РВУ процессов отметим еще и то, что "металлическая" плазма вакуумной дуги в рассматриваемых разрядниках способна пропускать между их основными электродами большие импульсные токи без существенного разрушения этих металлокерамических электродов. Падение напряжения на дуге в РВУ составляет от десятков до сотен вольт. Когда ток в основной цепи разряда ЕНЭ или ИНЭ падает до нуля, то вакуумный дуговой разряд в РВУ погасает и разрядник полностью "закрывается". Благодаря быстрой деионизации "металлической" плазмы и конденсации металлического пара на металлокерамических электродах разрядника вакуумный промежуток в РВУ характеризуется высокой скоростью восстановления своей электрической прочности [22]. Для цепи управления РВУ укажем то, что применительно к этому типу разрядников напряжение их поджига составляет не менее 5 кВ, а ток поджига должен иметь форму затухающей синусоиды с амплитудой первой полуволны не менее 0,1 кА. Кроме того, минимальная длительность тока поджига в РВУ должна быть равной около 1 мкс при длительности фронта рабочего тока между основными электродами разрядника более 10 мкс [22]. В табл. 1 представлены основные технические характеристики силовых вакуумных разрядников типа РВУ-31, РВУ-43, РВУ-45 и РВУ-47, выпускаемых сейчас в РФ [20-22].

Таблица 1  
Технические характеристики силовых вакуумных управляемых разрядников серии РВУ

Характеристика	РВУ-31	РВУ-43	РВУ-45	РВУ-47
Максимальное напряжение, кВ	50	30	25	25
Рабочее напряжение $U_p$ , кВ	0,5-50	0,5-30	0,5-25	0,5-25
Рабочий ток $I_p$ , кА	0,5-100	10-300	10-500	10-200
Максимальное количество коммутируемого электричества в импульсе $q_p$ , Кл	4	120	300	40
Время восстановления разрядником электрической прочности, мкс	30	100	100	100
Ресурс (число включений, шт.)	$10^5$	$10^4$	—	$10^4$
Напряжение поджига, кВ	8	5	5	5
Ток поджига, не менее, кА	0,1	1	1	1
Длительность импульса тока поджига, не менее, мкс	1	5	5	5
Частота срабатывания разрядника, не более, Гц	10	0,02	0,02	0,02
Габаритные размеры разрядника (диаметр/высота), мм	102/ 195	144/ 195	162/ 225	122/ 193
Масса разрядника, кг	3,5	7	10	5

На рис. 1 представлен внешний вид силовых вакуумных управляемых разрядников типа РВУ-31 на импульсный ток до 100 кА и напряжение до 50 кВ.

На рис. 2 приведены внешние виды силовых вакуумных управляемых разрядников соответственно типа РВУ-43, РВУ-47 и РВУ-45 на импульсные токи от 200 до 500 кА и напряжение от 25 до 30 кВ.



Рис. 1. Внешний вид силовых вакуумных управляемых коммутаторов типа РВУ-31 [22]



Рис. 2. Внешний вид силовых вакуумных управляемых коммутаторов типа РВУ-43, РВУ-47 и РВУ-45 (при их просмотре слева-направо) [22]

В табл. 2 указаны основные технические характеристики применяемых сейчас в силовых цепях ВЭФУ газоразрядных управляемых коммутаторов.

Таблица 2  
Сравнительные характеристики основных типов современных управляемых газоразрядных коммутаторов, используемых в цепях ВЭФУ [13,18,22]

Тип силовых коммутатора	$U_p$ , кВ	$I_p$ , кА	$q_p$ , Кл	Ресурс	Масса, кг
Вакуумный РВУ-43 (изготовитель: ВЭИ-АВИС, г. Москва)	0,5-30	10-300	120	$10^4$	7
Тиратрон ТДИ-50 (изготовитель: "ИТ", г. Рязань)	1-25	10-150	5	$5 \cdot 10^5$	2,5
Игнитрон ИРТ-6 (изготовитель: НИИ ГРП, г. Рязань)	0,5-25	10-100	30	$10^4$	3
Воздушный ТКВР-50 (изготовитель: НИПКИ, г. Харьков)	1-50	1-300	15	$5 \cdot 10^3$	$\leq 40$

Для полноты свойств указанных силовых коммутаторов требуется отметить и то, что согласно [18] у вакуумных разрядников серии РВУ при амплитудах коммутируемых ими импульсных токов микросекундной длительности порядка 20 кА и менее, нарастающих со скоростями менее  $4 \cdot 10^8$  А/с, как и у тиратронов серии ТДИ наблюдаются обрывы тока на

втором и последующих полупериодах его колебаний. Высокое быстродействие и широкий диапазон рабочих напряжений срабатывания управляемых разрядников серии РВУ, способных работать как при положительном, так и при отрицательном напряжении на основном вакуумном промежутке, позволяет данному типу высоковольтных коммутаторов успешно справляться с возложенными на них коммутационными задачами и в режиме их параллельной работы на общую активно-индуктивную нагрузку [18, 22].

**Применение вакуумных коммутаторов в устройствах защиты электрооборудования.** Так как защита электроэнергетического оборудования от повреждений (разрушений) при воздействии на него аварийных токов и перенапряжений осуществляется сейчас, в основном, путем шунтирования этого оборудования быстродействующими устройствами, то при решении подобных задач весьма перспективными оказались высоковольтные силовоточные вакуумные разрядники серии РВУ, устанавливаемые параллельно защищаемому оборудованию [23-25]. В случае, когда длительность аварийного тока превышает сотни миллисекунд целесообразным путем стало применение комбинации параллельно соединенных разрядника типа РВУ и электромеханического замыкателя. При такой комбинации аварийный ток через РВУ протекает в течение времени, равном времени срабатывания короткозамыкателя (ориентировочно порядка десятков миллисекунд) [24]. Выполненные российскими специалистами исследования показали, что в таких случаях возможно использование высоковольтных вакуумных контакторов с форсированным приводом при включении. Согласно данным, приведенным в [24, 25], при ходе подвижных контактов короткозамыкателя в вакууме до 6 мм время срабатывания его контакторов при включении может составлять примерно 5-10 мс. Пока не замкнутся контакты контактора короткозамыкателя разрядник типа РВУ пропускает через себя полный аварийный ток в десятки килоампер. Необходимо отметить, что при такой схеме защиты оборудования вакуумный разрядник серии РВУ создает условия для практически бездуговой коммутации аварийного тока в высоковольтном вакуумном контакторе [24]. Данный контактор типа КВО включается через примерно 5-20 мс после срабатывания РВУ. В результате чего вакуумный разрядник отключается и весь аварийный ток начинает протекать через вакуумный контактор. Подобная технология защиты электроэнергетического оборудования привела к созданию в РФ на основе вакуумного разрядника типа РВУ-43 и серийного однополюсного вакуумного контактора с электромагнитным приводом типа КВО-3-5-500 силовоточного быстродействующего короткозамыкателя среднего класса напряжения, предназначенного для защиты оборудования объектов электроэнергетики от действия аварийных импульсных токов амплитудой до 30 кА в течение до 2 с при напряжении до 10 кВ [24]. На рис. 3 представлен общий вид опытного образца такого комбинированного высоковольтного защитного устройства (ЗУ). Блок управления (БУ) такого устройства содержит блок запуска (БР) вакуумного разрядника типа РВУ-43 и блок форсированного включения (БК) вакуумного контактора типа КВО указанной выше модификации.

При возникновении аварийного режима в сети на вход БУ указанного ЗУ подается сигнал управления, который вызывает формирование на выходе БР импульса напряжения для запуска разрядника типа РВУ, а на выходе БК – импульса напряжения для включения привода контактора типа КВО. Общее время от

момента подачи импульса управления на вход БУ до включения разрядника типа РВУ в созданном ЗУ не превышает 10 мкс [24]. После этого через примерно 20 мс замыкаются контакты вакуумного контактора типа КВО и последний надежно шунтирует защищаемый электроэнергетический объект (разрядник РВУ при срабатывании контактора КВО отключается). Отключение вакуумного контактора происходит путем снятия с него постоянного сигнала управления (напряжение-27 В; ток-0,1 А; длительность сигнала-0,1 с) [24]. Типичные осциллограммы импульсного тока и напряжения на комбинированном короткозамыкателе в случае последовательного включения РВУ и КВО, полученные в РФ на силовоточном высоковольтном испытательном стенде, представлены на рис. 4, где  $t_1, t_2$  – соответственно моменты времени включения РВУ и замыкания контактов в КВО. Проведенные испытания подтвердили способность разработанного комбинированного короткозамыкателя быстро и надежно шунтировать защищаемый объект и длительно пропускать через себя импульсные милли- и секундные токи амплитудой не менее 30 кА. Время включения такого ЗУ составляет не более 10 мкс, ток термической и динамической стойкости – до 30 кА, а число коммутаций (ресурс) –  $10^4$  [24]. Отмечается, что рабочее напряжение этого короткозамыкателя можно повысить до 30-50 кВ (при использовании в КВО более высоковольтной вакуумной дугогасительной камеры), а время его включения уменьшить до 1-2 мкс (в случае запитки БР для РВУ от анодного напряжения).

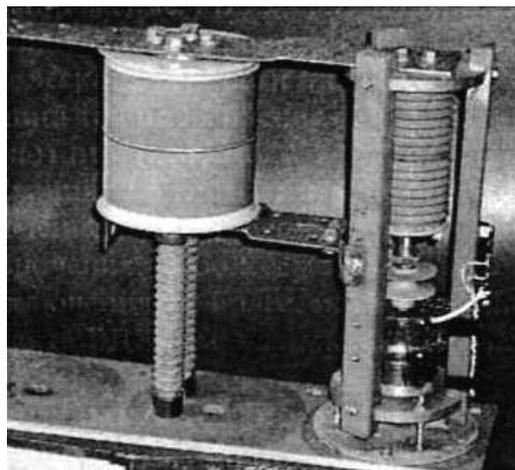


Рис. 3. Внешний вид опытного образца комбинированного быстродействующего силовоточного короткозамыкателя на аварийные токи до 30 кА и напряжение до 10 кВ с временем коммутации до 2 с (слева-разрядник типа РВУ; справа-контактор типа КВО) [24]

Шунтирующее ЗУ на рабочее напряжение более 50 кВ может быть изготовлено на основе нескольких последовательно соединенных высоковольтных вакуумных разрядников типа РВУ (например, с помощью РВУ-31) [25]. На рис. 5 приведены возможные способы последовательного соединения и схемы управления работой коммутаторов в цепях из  $n$ -разрядников типа РВУ, применяемых в составе такого ЗУ [26].

Схемы на рис. 5 позволили создать в РФ (ВНИЦ ВЭИ, г. Истра) быстродействующие шунтирующие устройства типа УЗ-80 (на рабочее напряжение 10-80 кВ; коммутируемый ток 0,1-10 кА; коммутируемый заряд за импульс до 1 Кл) и УЗ-120 (на рабочее напряжение 10-120 кВ; коммутируемый ток 0,1-10 кА; коммутируемый заряд за импульс до 1 Кл) [26].

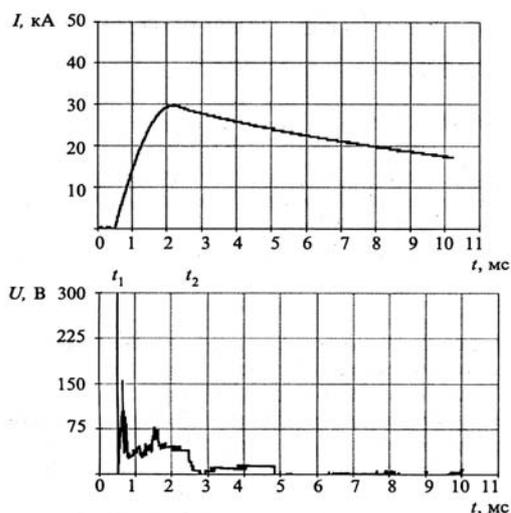


Рис. 4. Совмещенные осциллограммы импульсного тока  $I$  и напряжения  $U$  в защищаемой цепи испытательного стенда при работе опытного образца комбинированного короткозамыкателя, приведенного на рис. 3 [24]

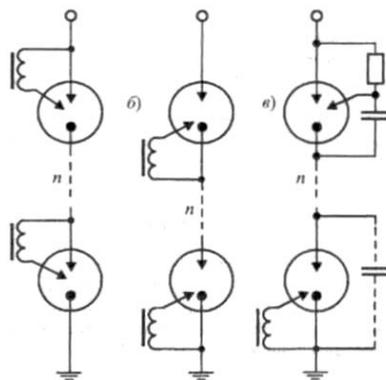


Рис. 5. Варианты схем управления последовательно соединенных вакуумных разрядников типа РВУ (*a*- поджиг на катоде; *b*- поджиг на аноде; *v*- зависимый поджиг) [26]

## 2. МОЩНЫЕ НЕУПРАВЛЯЕМЫЕ ВАКУУМНЫЕ КОММУТАТОРЫ

В последние годы в схемах сверхмощных ВЭФУ, содержащих ЕНЭ или ИНЭ, схемы обострения импульсов высокого напряжения с плазменным прерывателем тока (или с электрически взрывающимся тонким проводником как в [27]) и низкоиндуктивную нагрузку, расположенную в вакуумном объеме, и предназначенных для осуществления инерциального термоядерного синтеза, нашли применение мощные неуправляемые вакуумные коммутаторы [1, 28]. К этим коммутаторам ВЭФУ предъявляются высокие технические требования: во-первых, электрическая прочность их изоляционных конструкций должна составлять не менее 100 кВ/см; во-вторых, время их электрического срабатывания  $\tau_c$  должно быть не более 10 нс; в-третьих, их индуктивность не должна превышать значений, равных около 20 нГн [28]. Работа таких коммутаторов основана на взрывоэмиссионных явлениях, протекающих в их металлических электродных системах с вакуумным зазором от воздействия на них сильных электрических полей, элементарная ячейка которых состоит из электронного взрывоэмиссионного диода, содержащего катод и анод [1, 3].

В [28] был описан мощный неуправляемый вакуумный коммутатор на импульсное напряжение до 130 кВ и токи наносекундного временного диапазона в

десятки килоампер, представляющий собой ряд последовательно соединенных вакуумных диодов (до шести штук) с рабочими зазорами  $h$  порядка 1 мм (рис. 5). В каждом вакуумном диоде такого коммутатора катод 1 и анод 2 были изготовлены соответственно в виде плоских дисков толщиной 1 мм и круглых цилиндрических выступов (диаметром 40 мм и высотой 9 мм) из нержавеющей стали. Конусные изоляторы 4 между катодами 1 и анодами 2 электродной системы коммутатора с рабочими вакуумными зазорами 3 были выполнены из оргстекла (с диаметром у основания 35 мм и высотой 10 мм). Конусность этих изоляторов была обусловлена необходимостью развития длины их наружного рабочего периметра и соответственно обеспечения их электрической прочности вдоль наружной изоляционной поверхности, перекрывающей вакуумный межэлектродный промежуток коммутатора. При сборке вакуумные диоды коммутатора в продольном направлении могли стягиваться между собой по круговому периметру при помощи изоляционных или металлических шпилек (рис. 6).

Для специалистов, работающих в области высоковольтной импульсной техники (ВИТ), интересно отметить то, что в [28] время срабатывания коммутатора  $\tau_c$  (или время его коммутации) определялось экспериментально по осциллограммам коммутируемого напряжения (тока) как интервал времени от начала спада напряжения на коммутаторе до появления в его силовоточной цепи импульсного тока. При этом в [28] опытным путем было показано, что применение многозворных диодов с величиной вакуумного зазора в каждой диодной ячейке в 1 мм позволяет снизить значение времени  $\tau_c$ . Физически объясняется это тем, что при использовании в силовоточном коммутаторе (как в этой, так и в других его модификациях) ряда последовательных вакуумных (или иных изоляционных газовых) зазоров скорость заоротки  $v_n$  его суммарного вакуумного (газового) зазора возрастает прямо пропорционально числу  $k$  отдельных зазоров. Возрастание данной скорости обусловлено встречным движением катодной и анодной плазмы одновременно в каждом вакуумном (газовом) зазоре. В разработанном согласно [28] мощном вакуумном коммутаторе суммарная скорость движения плазмы в его межэлектродных зазорах составила порядка  $10^5$  м/с. Отсюда и получаем оценочное расчетное значение для времени срабатывания  $\tau_c$  рассматриваемого неуправляемого силовоточного многозворного вакуумного разрядника в виде:  $\tau_c = h / v_n = 10$  нс, которое было достоверно подтверждено и экспериментально на соответствующем испытательном высоковольтном стенде [28].

На рис. 7 показан внешний вид рассматриваемого высоковольтного силовоточного вакуумного многозворного коммутатора с продольным осевым сечением согласно рис. 6, созданного недавно сотрудниками ФГУП РНЦ "Курчатовский институт" (г. Москва) в рамках выполнения российской научно-технической программы "Байкал" по термоядерному синтезу [28].

На рис. 8 приведена высоковольтная испытательная схема для опытного определения технических характеристик указанного выше мощного неуправляемого вакуумного многозворного коммутатора.

На рис. 9 представлены интересные для специалистов из области ВИТ совмещенные характерные осциллограммы импульсного напряжения  $U$  и тока  $I$  на исследуемом силовоточном неуправляемом вакуумном коммутаторе, включенном в разрядную цепь

испытательной ВЭФУ согласно данным рис. 8, которые были получены при следующих электрических параметрах разрядной цепи ВЭФУ с мощным ЕНЭ:  $C_{\Gamma} = 0,125$  мкФ;  $U_{\Gamma} = (70-130)$  кВ;  $L_{\Gamma} = 2,4$  мкГн.

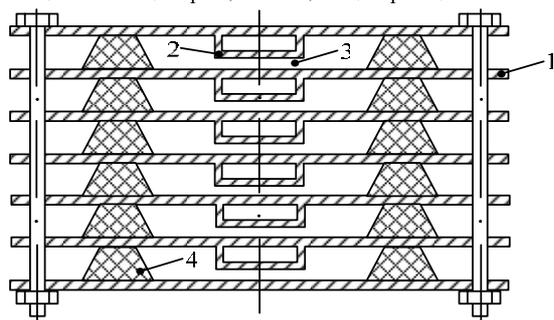


Рис. 6. Упрощенный вид продольного сечения мощного неуправляемого вакуумного многозазорного коммутатора (1- дисковый металлический катод; 2- анод с круглым металлическим выступом; 3- отдельный вакуумный зазор между катодом и анодом; 4-отдельный конусный изолятор)[28]

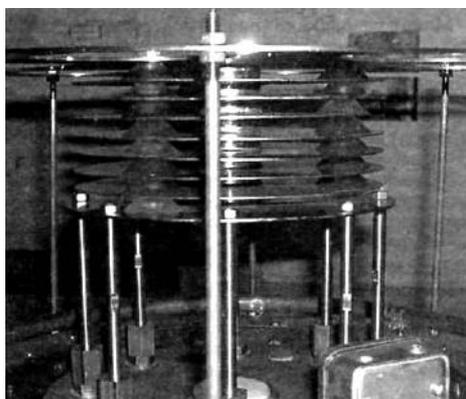


Рис. 7. Внешний вид мощного неуправляемого вакуумного многозазорного коммутатора на напряжение до 130 кВ [28]

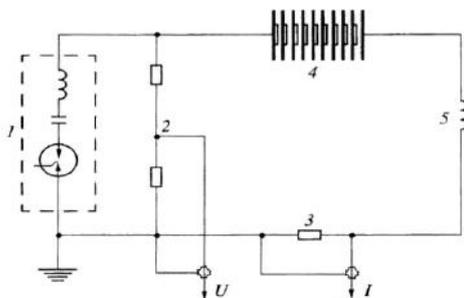


Рис. 8. Схема ВЭФУ для испытания мощного неуправляемого вакуумного многозазорного коммутатора (1- ЕНЭ генератора импульсов напряжения; 2- омический делитель напряжения; 3- измерительный шунт; 4- вакуумный многозазорный коммутатор; 5- низкоиндуктивная нагрузка) [28]

Данные рис. 9 наглядно демонстрируют нам физический смысл такого важного и указанного автором чуть выше электрофизического понятия как время срабатывания коммутатора  $\tau_c$  (при этом для его нахождения по кривым рис. 9 необходимо увязывать во времени между собой выше предложенным согласно [28] путем соответственно кривые 1 и 5, 2 и 6, 3 и 7, 4 и 8). Отметим, что в данных экспериментах с высоковольтным высокоскоростным вакуумным многозазорным коммутатором скорость нарастания напряжения между его торцевыми (крайними) дисковыми стальными электродами составляла около 1,5 кВ/нс, а на его отдельных внутренних взрывоэмиссионных

диодах с вакуумным зазором  $h = 1$  мм – примерно 0,25 кВ/нс (в шесть раз меньше, что соответствует числу  $k$  вакуумных зазоров в коммутаторе) [28]. Несмотря на уменьшение скорости нарастания напряжения на отдельных вакуумных зазорах  $h$  этого коммутатора, за счет одновременного уменьшения времени закоротки каждого из них и происходит уменьшение общего времени срабатывания коммутатора  $\tau_c$ . Отсюда нам можно сделать важный и обобщающий вывод в области теории высоковольтных сильноточных коммутаторов с вакуумной (газовой) межэлектродной изоляцией о том, что чем меньше в высоковольтном сильноточном многозазорном коммутаторе на рабочее напряжение  $U_p$  величина отдельного межэлектродного промежутка  $h$  (например, в  $k$  раз, что соответствует при заданном уровне напряжения  $U_p$  увеличению в  $k$  раз числа этих межэлектродных промежутков), тем будет и меньше (в тоже число  $k$  раз) величина времени срабатывания  $\tau_c$  для всего коммутатора, имеющего суммарный межэлектродный изоляционный промежуток, равный величине  $k \cdot h$ .

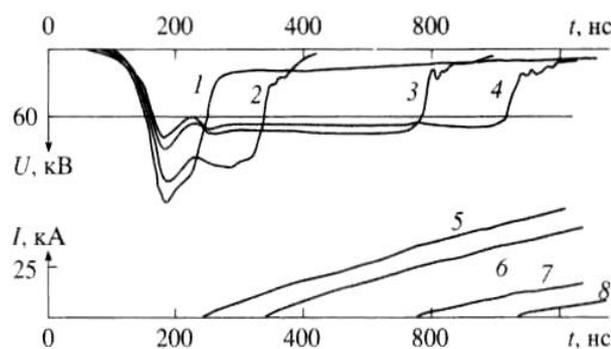


Рис. 9. Осциллограммы напряжения  $U$  (кривые 1-4) и тока  $I$  (кривые 5-8) на вакуумном многозазорном коммутаторе, приведенном на рис. 7 (кривые 1-8 расположены в порядке уменьшения подаваемого на коммутатор напряжения) [28]

В пользу такого обобщающего вывода свидетельствует установленный в [28] научный факт: скорость движения плазмы  $v_n$  в вакуумных зазорах коммутатора не зависит от числа этих зазоров и соответственно от уровня коммутируемого им электрического напряжения. Поэтому такая основная для указанного разрядника коммутационная характеристика как значение времени его срабатывания  $\tau_c$  будет определяться только величиной отдельного вакуумного зазора  $h$  в многозазорном коммутаторе. Рекомендуемый на основании проведенных экспериментальных исследований авторами работы [28] уровень напряжения, прикладываемый к каждому миллиметровому вакуумному зазору в течение времени 20-50 нс, может составлять 20-50 кВ. При скорости нарастания напряжения на каждом вакуумном зазоре до 1,16 кВ/нс и средней по длине коммутатора напряженности электрического поля от 50 до 100 кВ/см длительность импульса напряжения, ограничиваемая этим разрядником, составляла 40-600 нс (см. рис. 9). Было показано, что в разработанной конструкции сильноточного вакуумного разрядника с позиций его электрической прочности высота конусных изоляторов из оргстекла в межэлектродных вакуумных зазорах может быть уменьшена до 5 мм и должна превышать величину выбранного рабочего вакуумного зазора  $h = 1$  мм соответственно не менее чем в пять раз.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании материалов ряда опубликованных исследований российских специалистов в области ВИТ выполнен весьма обширный обзор новых научно-технических разработок по созданию и практическому внедрению нового поколения надежно и длительно функционирующих мощных управляемых (неуправляемых) высоковольтных силовых вакуумных разрядников, применяемых в разрядных электрических цепях мощных ВЭФУ с ЕНЭ (ИНЭ) для выполнения в сфере ИЭ современных научных и технологических задач и в схемах защиты дорогостоящего силового электроэнергетического оборудования от воздействия аварийных токов и перенапряжений атмосферного и коммутационного происхождения.

2. Наряду с кратким описанием новых конструкций и их особенностей из рассматриваемого класса разрядников, указанием достигнутых ими высоких уровней для технических характеристик при коммутации импульсных напряжений и токов различной длительности (от наносекундного временного диапазона до секундного) в представленном обзоре в сжатом виде приведены и основные физические положения, лежащие в основе протекающих в них сложных электрофизических процессов и облегчающие как профессионально подготовленному читателю, так и начинающим научно-техническим работникам восприятие исследуемой здесь техники и электрофизики высоких напряжений и больших импульсных токов.

3. Автор посчитал бы свою нелегкую научно-публицистическую задачу выполненной при условии определенного использования приведенных передовых зарубежных разработок и результатов в исследованиях, проводимых сейчас в Украине в области ВИТ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника.- М.: Наука, 2004. - 704 с.
2. Александров А.Ф., Рухадзе А.А. Силовоточные электро-разрядные источники света // Успехи физических наук.-1974.-т.112.-№2. - С. 195-230.
3. Накопление и коммутация энергии больших плотностей// Под ред. Бостника У., Нарди В., Цукера О.: Пер. с англ. Э.И. Асиновского, В.С. Комелькова.- М.: Мир, 1979. - 474 с.
4. Баранов М.И. Ретроспектива, современное состояние и перспективы развития исследований в области создания электроустановок с мощными накопителями электрической и магнитной энергии // Электротехника і електромеханіка.-2007.- №5.- С. 48-60.
5. Beznasyuk N.N., Galakhov I.V., Garanin S.G. et al. The four-channel laser facility LUCH- a module of the ISKRA-6 facility// Proceeding of XXVII European Conference on Laser Interaction with Matter (ECLIM-2002), 2002.- p. 105-110.
6. Безуглов В.Г., Беляев С.А., Галахов И.В. и др. Новое поколение мощных полупроводниковых коммутаторов для применений импульсной энергетике // Труды международной научно-технической конференции МИОМ-2007 (Россия, г. Самара, СГАУ, 18-19 сентября 2007).- С. 28-34.
7. Техника больших импульсных токов и магнитных полей// Под ред. В.С. Комелькова.- М.: Атомиздат, 1970. - 472 с.
8. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля.- М.: Мир, 1972. - 391 с.
9. Кремнев В.В., Месяц Г.А. Методы умножения и трансформации импульсов в силовоточной электронике.- Новосибирск: Наука, 1987. - 226 с.
10. Бочков В.Д., Дягилев В.М., Королев Ю.Д. и др. Мощные коммутаторы тока с низким давлением газа // Приборы и техника эксперимента.-1998.-№5.-С. 91-95.
11. Бойко Н.И., Евдошенко Л.С., Иванов В.М. и др. Высоковольтные искровые разрядники для технологических установок // Приборы и техника эксперимента.-2001.-№2. - С. 79-88.
12. Баранов М.И., Бочаров Ю.П., Зябка Ю.П. и др. Высоковольтные силовоточные искровые коммутаторы для генераторов импульсных напряжений и токов // Технічна електродинаміка.-2003.-№3. - С. 41-47.

13. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др. Генератор тока искусственной молнии для натуральных испытаний технических объектов // Приборы и техника эксперимента.-2008.-№3. - С. 81-85.
14. Ермилов И.В. Разработка комплекса высоковольтного силовоточного оборудования нового поколения для магнитно-импульсной обработки материалов // Труды международной научно-технической конференции МИОМ-2007 (Россия, г. Самара, СГАУ, 18-19 сентября 2007). - С. 88-98.
15. Баранов М.И. Применение новых газоразрядных и твердотельных полупроводниковых коммутаторов в силовоточных цепях мощных высоковольтных электрофизических установок // Электротехніка і електромеханіка.- 2009.- №1.- С. 65-68.
16. Bochkov V.D., Bochkov D.V., Dyagilev V.M. et al. High power pseudospark switches for pulsed power// Proceeding International Power Modular Conference, Hollywood, USA, June 30-July 3, 2002. - p. 475-478.
17. Бочков В.Д., Бочков Д.В., Гнедин И.Н. и др. Мощные псевдоискровые коммутаторы для импульсной энергетике// Труды международной научно-технической конференции МИОМ-2007 (Россия, г. Самара, СГАУ, 18-19 сентября 2007). - С. 23-27.
18. Юсупов Р.Ю. Магнитно-импульсные установки нового поколения для промышленных и учебно-научных целей // Труды международной научно-технической конференции МИОМ-2007 (Россия, г. Самара, СГАУ, 18-19 сентября 2007).- С. 251-259.
19. Грехов И.В., Козлов А.К., Коротков С.В. и др. Высоковольтные р.в.д. переключатели субмегаамперных импульсов тока микросекундного диапазона длительности // Приборы и техника эксперимента.-2003.-№1.-С. 53-55.
20. Алферов Д.Ф., Иванов В.П., Сидоров В.А. Силовоточные вакуумные коммутирующие устройства для мощных накопителей энергии // Приборы и техника эксперимента.-1998.-№5. - С. 83-90.
21. Алферов Д.Ф., Иванов В.П., Сидоров В.А. Новое поколение силовоточных вакуумных управляемых разрядников// Прикладная физика.-2001.-№4. - С. 41-48.
22. Алферов Д.Ф., Иванов В.П., Сидоров В.А. Управляемые вакуумные разрядники: основные свойства и применение// Электро.-2002.-№2. - С. 31-37.
23. Алферов Д.Ф., Белкин Г.С., Будовский А.И. Применение быстродействующих управляемых коммутирующих устройств в электроэнергетике // Электричество.-1998.-№7.- С. 2-8.
24. Алферов Д.Ф., Будовский А.И., Иванов В.П. и др. Силовоточный быстродействующий короткозамыкатель// Электротехника.-2003.-№11. - С. 56-59.
25. Матвеев Н.В., Иванников И.А., Хабаров Д.А. Быстродействующая защита нагрузки от токов короткого замыкания на управляемых вакуумных разрядниках // Прикладная физика.-2001.-№4. - С. 49-57.
26. Алферов Д.Ф., Матвеев Н.В., Сидоров В.А. и др. Высоковольтное быстродействующее шунтирующее устройство // Электротехника.-2003.-№11. - С. 60-64.
27. Патент №12376 Україна, МПК H03K3/53. Установка для отримання імпульсного струму блискавки / М.І. Баранов, М.М. Ігнатенко, А.К. Колобовський.- Опубл. 2006.- Бюл. №2.
28. Долгачев Г.И., Масленников Д.Д., Ушаков А.Г. Силовоточный вакуумный разрядник // Приборы и техника эксперимента.- 2004.-№5. - С. 82-86.

Поступила 17.06.2008

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., с.н.с.  
НИПКИ "Молния" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт"  
Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,  
НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ"  
тел. (057) 707-68-41, факс (057) 707-61-33,  
e-mail: eft@kpi.kharkov.ua