

## ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ И ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КОММУТАТОРОВ В СИЛЬНОТОЧНЫХ ЦЕПЯХ МОЩНЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Баранов М.И., 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

*Виконано огляд основних сучасних закордонних досліджень в області розробки і створення нового покоління потужних комутаторів, що використовуються у сильнострумних розрядних колах високовольтних електрофізичних установок з емнісними нагромаджувачами енергії для наукових і технологічних цілей.*

*Выполнен обзор основных современных зарубежных исследований в области разработки и создания нового поколения мощных коммутаторов, используемых в сильнотоочных разрядных цепях высоковольтных электрофизических установок с емкостными накопителями энергии для научных и технологических целей.*

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в энергетической сфере экономики промышленно развитых государств (соответственно и в сфере человеческой деятельности) более явно обозначилось такое новое понятие и направление ее дальнейшего развития как импульсная энергетика (ИЭ) [1, 2]. Составляющей частью этого понятия (направления) является тот близкий профессиональным интересам электрофизиков сектор ИЭ, который связан с созданием и применением в научных и промышленных целях мощного импульсного электроэнергетического оборудования: прежде всего, это касается высоковольтных электрофизических установок (ВЭФУ), запасующих в своих мощных накопителях электрическую или магнитную энергию, которая в дальнейшем может выделяться в той или иной электрической нагрузке [3]. В этой связи следует отметить то, что в передовых странах мира сейчас активно ведутся поисковые научные исследования, направленные на изучение возможности искусственного создания новых долговременных источников энергии. Одним из таких направлений, вписывающимся в стратегию развития ИЭ, являются работы по импульсному термоядерному синтезу, использующему мощные лазерные системы (ЛС) [3, 4]. В таких ЛС как раз и используются специальные мощные ВЭФУ, обеспечивающие импульсную световую накачку их активных элементов-резонаторов сверхвысокочастотного электромагнитного поля с твердым (газообразным) веществом, в котором при определенных условиях наступает интенсивное индуцированное излучение в оптической области спектра [5]. Поэтому дальнейшее развитие ИЭ напрямую связано с техническим прогрессом в области электрофизических приборов, осуществляющих надежную и долговременную коммутацию сильнотоочных электрических цепей ВЭФУ. От наличия таких сравнительно дешевых и надежно работающих в условиях воздействия высоких импульсных напряжений (ВИН) и больших импульсных токов (БИТ) электрофизических приборов-коммутаторов в определяющей мере зависит процесс успешного внедрения электротехнологий ИЭ в нашу реальную энергетическую практику. Кроме того, указанные коммутаторы необходимы и для решения ряда других важ-

ных научно-технических задач в области электротехнологического применения мощных ВЭФУ [6-10].

Известно, что в силовых электрических цепях, характеризующихся наличием ВИН и БИТ, в качестве традиционных мощных высоковольтных коммутаторов могут использоваться [6-13]: игнитроны, тиратроны, искровые вакуумные и газовые разрядники различных конструкций. Эти типы коммутаторов объединяет то, что все они относятся к газоразрядным физическим приборам. В настоящее время из-за вопросов экологической безопасности разработчики ВЭФУ стараются не применять в их сильнотоочных разрядных цепях игнитроны, содержащие ртуть и ее пары. На определенном этапе развития высоковольтной импульсной техники искровые газовые (вакуумные) разрядники выполнили (да и сейчас продолжают пока успешно выполнять) отведенную им "роль" быстрых высоковольтных ключей, коммутирующих электрические цепи ВЭФУ [6-14]. Новый XXI век в области электрофизической науки и техники принес новые научно-технические идеи по принципам построения и практического создания нового высоковольтного оборудования, предназначенного для более устойчивой и длительной коммутации электрической энергии высокой плотности, запасаемой, например, в мощных емкостных накопителях энергии (ЕНЭ) ВЭФУ [15-17]. Рассмотрим ниже по результатам ряда исследований, проводимых сейчас за рубежом (в частности, в Российской Федерации, США и Италии) [4, 15-17], новые поколения мощных газоразрядных и твердотельных полупроводниковых коммутаторов, предназначенных для работы с повышенной надежностью и долговечностью в сильнотоочных разрядных цепях мощных ВЭФУ с ЕНЭ и позволяющих решать возникающие на сегодня в передовой области ИЭ перед специалистами некоторых развитых стран мира (в том числе и Украины) важные электротехнические и электрофизические задачи практической направленности.

### 1. НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ МОЩНЫХ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ КОММУТАТОРОВ

*Новые тиратроны-коммутаторы.* В Российской Федерации (РФ) данным типом мощных разрядников вот уже более 20 лет занимается ООО "Импульсные

технологии" (г. Рязань) [15]. Данной фирмой в свое время были разработаны и сейчас выпускаются ТДИ, ТПИ и ТГИ-типы тиратронов, нашедшие, особенно в последние несколько лет, достаточно широкое применение в схемах ВЭФУ. Прежде всего, это касается мощных исследовательских установок термоядерного синтеза с обращенным полем (FRC-установки, переводимые с английского как *Field Reversed Configuration*-установки с обращенной конфигурацией магнитного поля) [15]. Эти установки создаются ныне в США как альтернатива известным советским установкам термоядерного синтеза ТОКАМАК, использующим магнитные "ловушки" сверхвысокотемпературной плазмы замкнутого тороидального типа [18]. Экспериментальные исследования на магнитном модуле FRC-установки, совместно проведенные российскими и американскими специалистами на стенде *University Washington*, показали, что тиратроны типа ТДИ1-50к/45 в разрядной цепи ЕНЭ (емкостью  $C=3,7$  мкФ) работают значительно надежней игнитронов при зарядных напряжениях  $U_p$  конденсаторов до 35 кВ и разрядных токах ВЭФУ амплитудой до  $I_m=150$  кА [15]. В этих экспериментах однократно коммутируемый тиратронами заряд составлял  $q_p=5$  Кл, а скорость нарастания импульсов тока при их частоте следования в 0,01 Гц была равна не менее  $2 \cdot 10^{11}$  А/с. На рис. 1 как раз и показана использовавшаяся в этих опытах сборка из двух ТДИ-тиратронов с высоковольтным конденсатором, выдержавшая при испытаниях коммутацию около  $9 \cdot 10^3$  токовых импульсов ( $U_p=25$  кВ;  $C=1,8$  мкФ;  $I_m=120$  кА) и оставшаяся после такой наработки в рабочем состоянии [15].

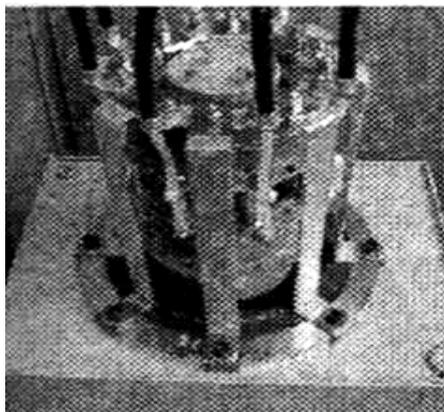


Рис. 1. Внешний вид сборки из двух ТДИ-тиратронов на рабочий импульсный ток до 200 кА, подключенных прямо на высоковольтный коаксиальный вывод конденсатора (например, серийного российского конденсатора типа ИК-50-3 с металлическим корпусом) [15]

Для определения перегрузочной способности тиратронов типа ТДИ1-50к/45 на их сборке, показанной на рис. 1, были проведены дополнительные более жесткие испытания при  $U_p=25$  кВ,  $C=17,5$  мкФ и переносимом токовым моноимпульсом заряде  $q_p$  до 10 Кл, коммутируемом ими с частотой следования импульсов тока 1/60 Гц. В этом случае указанные тиратроны-коммутаторы выдержали еще воздействие  $10^3$

импульсов тока с амплитудой  $I_m=200$  кА. Из строя они вышли из-за термической перегрузки центральных частей катодов, обусловленной предельными значениями на них эмиссионной плотности импульсного тока [15]. Для увеличения рабочего ресурса этого типа тиратронов в ООО "Импульсные технологии" (РФ) недавно была создана усовершенствованная конструкция тиратрона ТДИ1-50к/45-1 на рабочее напряжение до 30 кВ и коммутируемые импульсные токи микросекундной длительности амплитудой до 300 кА, способного работать в полностью безнакальном режиме катода и имеющего мгновенную готовность к работе в силовых электрических цепях ВЭФУ для научных и технологических целей [15].

**Новые газовые управляемые разрядники.** В российском ЗАО "Русская Технологическая Группа 2" (г. Рязань) взамен устаревшим конструкциям высоковольтных газоразрядных коммутаторов в настоящее время разработано и создано новое поколение мощных газовых управляемых с керамическим корпусом разрядников типа РГУ, показанных на рис. 2 [16].



Рис. 2. Внешний вид газовых управляемых разрядников с керамическим корпусом типа РГУ на рабочие импульсные токи 20-100 кА и напряжения 10-100 кВ (при нумерации слева-направо: 1-РГУ1-15-100; 2-РГУ1-50-100; 3-РГУ1-100-100; 4-РГУ2-50-50; 5-РГУ2-10-50; 6-РГУ3-20-20) [16]

Газовые управляемые керамические разрядники РГУ имеют рабочее напряжение  $U_p$  от 1 до 100 кВ и рассчитаны на коммутируемые импульсные токи амплитудой  $I_m$  от 20 до 100 кА при их длительности до  $\tau_{и}=100$  мкс [16]. При  $\tau_{и}>100$  мкс значения  $I_m$  по току для РГУ снижаются. Данные разрядники внешне различаются диаметром  $d_k$  несущего керамического цилиндра, имеющим в зависимости от их предельного тока следующие значения: для РГУ1 на токи  $I_m=100$  кА –  $d_k=125$  мм, для РГУ2 на токи  $I_m=50$  кА –  $d_k=80$  мм и для РГУ3 на токи  $I_m=20$  кА –  $d_k=25$  мм. В таблице приведены основные технические характеристики газовых управляемых разрядников типа РГУ для давления рабочего газа в межэлектродном промежутке  $1,013 \cdot 10^5$  Па и его температуры в 20 °С при  $\tau_{и} \leq 100$  мкс. На рис. 3 показано типичное поперечное сечение газового управляемого керамического разрядника типа РГУ, имеющего два основных металлических электрода сложной формы и один центральный управляющий металлический электрод дисковой формы. Конструкция основных электродов допускает продольную продувку межэлектродного газового

промежутка в разрядниках серии РГУ. Разработчиком этих разрядников было установлено, что повышенный нагрев их основных и управляющего электродов приводит к снижению напряжения самопробоя, а отсутствие продувки в РГУ вызывает запыление внутренней стенки керамического цилиндра окислами металла электродов и соответственно приводит к снижению уровня предельно допустимого рабочего напряжения [16]. Отметим, что по данным [16] износ управляющего металлического дискового электрода в разрядниках типа РГУ составляет  $1,1 \cdot 10^{-4}$  г/Кл, а для основных электродов –  $4,4 \cdot 10^{-5}$  г/Кл. Ресурсные испытания изготовителя разрядников типа РГУ показали, что при  $\tau_{и} = 700$  мкс (вместо рекомендуемых им  $\tau_{и} \leq 100$  мкс для нормальной работы РГУ) и переносимом заряде за один токовый импульс в  $q_p = 1,44$  Кл для разрядника РГУ1-30-100 ( $U_p = 30$  кВ;  $I_m = 100$  кА) рабочий ресурс не превышает  $6,2 \cdot 10^3$  срабатываний [16].

Технические характеристики разрядников серии РГУ

Тип коммутатора	$U_p$ кВ	$I_m$ кА	$q_p$ Кл	Ресурс	Масса, кг
РГУ1-10-100	10	100	5	$2 \cdot 10^5$	3
РГУ1-20-100	20	100	5	$2 \cdot 10^5$	5
РГУ1-30-100	30	100	5	$2 \cdot 10^5$	5
РГУ1-50-100	50	100	5	$2 \cdot 10^5$	5
РГУ1-75-100	75	100	5	$2 \cdot 10^5$	6
РГУ1-100-100	100	100	5	$10^5$	6
РГУ2-5-50	5	50	2,5	$10^5$	1
РГУ2-10-50	10	50	2,5	$10^5$	1
РГУ2-20-50	20	50	2,5	$10^5$	1,5
РГУ2-30-50	30	50	2,5	$10^5$	1,5
РГУ2-40-50	40	50	2,5	$10^5$	1,5
РГУ2-50-50	50	50	2,5	$10^5$	1,5
РГУ3-5-20	5	20	1	$5 \cdot 10^4$	0,3
РГУ3-10-20	10	20	1	$5 \cdot 10^4$	0,4
РГУ3-20-20	20	20	1	$5 \cdot 10^4$	0,5

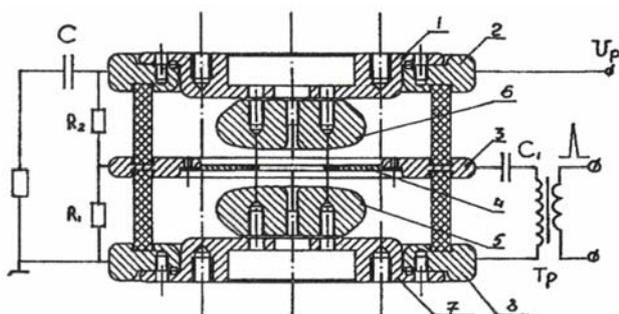


Рис. 3. Схематическое типичное изображение поперечного сечения газопроводящего керамического разрядника типа РГУ (1, 7-металлические фланцы потенциального и заземленного электродов; 2, 8 - технологические металлические фланцы; 3, 4-управляющий металлический дисковый электрод; 5, 6-основные металлические электроды) [16]

Согласно рис. 3 для включения разрядника РГУ в работу на его управляющий дисковый электрод 4 с острой внутренней круговой кромкой и наружным фланцем 3, находящийся под электрическим потенциалом  $U_p/2$ , известным путем [6, 13] через импульс-

ный повышающий трансформатор  $T_p$  с разделительным конденсатором  $C_1$  в его вторичной обмотке от внешнего высоковольтного поджигающего генератора подается пусковой микросекундный импульс напряжения, пробивающий иницирующий газовый промежуток между управляющим 4 и заземленным 5 электродами разрядника. Электрический пробой последнего вызывает пробой газового промежутка между основными электродами 5 и 6 РГУ и соответственно разряд предварительно заряженной рабочей емкости  $C$  ЕНЭ ВЭФУ на омическую электрическую нагрузку. Автор работы [16] отмечает высокую стабильность работы газовых управляемых керамических разрядников серии РГУ, обусловленную постоянством напряжения их самопробоя и отсутствием заметного влияния искрового сильноточного разряда между их основными электродами на электрические характеристики несущего керамического цилиндра.

## 2. НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ МОЩНЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КОММУТАТОРОВ

В настоящее время рядом российских организаций (РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров; ИПФ РАН, г. Новгород; НИЦ ОАО "Электровыпрямитель", г. Саранск) созданы и испытаны в реальной работе в составе сильноточных разрядных цепей ВЭФУ новые мощные твердотельные полупроводниковые коммутаторы на базе реверсивно-включаемых динисторов (РВД-коммутаторы) [17]. Каждый такой реверсивно-включаемый динистор (РВД) является двухэлектродным аналогом широко известной конструкции тиристора с обратной проводимостью и интегрированным в его полупроводниковую кремниевую структуру обратным диодом, который встречно-параллельно включен тиристорной части РВД [17]. Внешне каждый РВД представляет собой круглую конструкцию таблеточного типа, выполненную в металлокерамическом корпусе или без него с защитой периферийной области динистора от внешних воздействий (рис. 4).

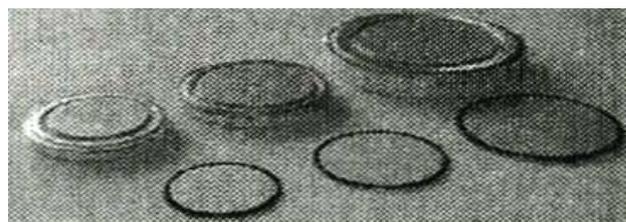


Рис. 4. Внешний вид отдельных реверсивно-включаемых динисторов-коммутаторов типа РВД на рабочие импульсные токи 250-500 кА (верхний ряд – динисторы с герметичным металлокерамическим корпусом; нижний ряд – динисторы бескорпусного исполнения с диаметром их полупроводниковых силовых элементов 63 мм-  $I_m = 250$  кА, 76 мм-  $I_m = 380$  кА и 100 мм-  $I_m = 500$  кА) [17]

Проведенные исследования показали, что наиболее перспективной областью работы высоковольтных полупроводниковых ключей РВД-коммутаторов является коммутация БИТ в микросекундном и субмиллисекундном временных диапазонах [2, 17]. РВД могут образовывать последовательные сборки жестко включенных друг за другом динисторов на напряжения в

десятки киловольт (блокирующее напряжение каждого РВД составляет  $\leq 2,4$  кВ). Число динисторов в последовательной сборке определяет рабочее напряжение РВД-коммутатора. Включение РВД производится коротким импульсом тока (амплитудой до 1,5 кА при  $\tau_{и}$  до 2 мкс) от внешнего генератора управления при кратковременном приложении к нему обратного напряжения. Благодаря оригинальному способу включения и специальной конструкции кремниевой пластины динистора обеспечивается полное и однородное включение РВД по всей его активной площади и за очень короткий промежуток времени. Разработана специальная компьютерная программа подбора РВД для последовательной сборки динисторов, учитывающая их ВАХ, токи утечки, усилия и межконтактные материалы при стягивании сборки и многое другое [17]. На рис.5 показан РВД-коммутатор типа КРД-25-300 на 25 кВ, предназначенный для длительной работы в составе мощной лазерной установки "Искра-6" (создается в РФЯЦ-ВНИИЭФ с итальянским участием) в моноимпульсном режиме коммутации БИТ амплитудой  $I_m = 300$  кА при их длительности до 0,5 мс [4, 17]. Данный твердотельный коммутатор содержит в своем изоляционном цилиндрическом корпусе последовательную сборку из 15 шт. РВД диаметром 76 мм с блокирующим напряжением 2,4 кВ.

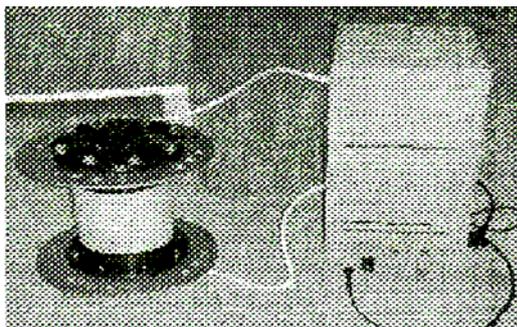


Рис. 5. Внешний вид РВД-коммутатора типа КРД-25-300 на рабочий импульсный ток 300 кА и напряжение 25 кВ (слева), подключенного к высоковольтному генератору запускающих микросекундных импульсов тока амплитудой до 1,5 кА (справа) [17]

Испытания РВД-коммутатора типа КРД-25-300 показали, что в нем достигается высокий показатель удельной коммутируемой мощности, приходящейся на единицу его объема, и составляющий  $2,5 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>3</sup>. Высоковольтные РВД-коммутаторы типа КРД-25-100 (с РВД  $\varnothing$  63 мм) и КРД-25-170 (с РВД  $\varnothing$  76 мм) были успешно испытаны в составе мощного ЕНЭ неодимового лазера установки "Луч" (РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров) в режиме коммутации одиночных токовых импульсов субмиллисекундного диапазона при  $U_p = 24$  кВ,  $I_m = 470$  кА и  $q_p = 145$  Кл [17].

#### ЛИТЕРАТУРА

[1] Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника.- М.: Наука, 2004.- 704 с.  
 [2] Тучкевич В.М., Грехов И.В. Новые принципы коммутации больших мощностей полупроводниковыми приборами.- Л.: Наука, 1988.- 220 с.

[3] 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.  
 [4] 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.  
 [5] Баранов М.И. Радиоэлектроника: краткая история ее становления в качестве основообразующей физико-технической области электричества и научно-технического прогресса человечества // Электротехника і електромеханіка.- 2008.- №4.- С. 5-12; №5.-С. 5-9.  
 [6] Техника больших импульсных токов и магнитных полей/ Под ред. В.С. Комелькова.- М.: Атомиздат, 1970.- 472 с.  
 [7] Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля.- М.: Мир, 1972.- 391 с.  
 [8] Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов.- Харьков: Вища школа, 1977.- 168 с.  
 [9] Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий.- Киев: Наукова думка, 1990.- 208 с.  
 [10] Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий.- Харьков: МОСТ-Торнадо, 2003.- 288 с.  
 [11] 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.  
 [12] 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.  
 [13] Баранов М.И., Бочаров Ю.П., Зябко Ю.П. и др. Высоковольтные сильноточные искровые коммутаторы для генераторов импульсных напряжений и токов // Технічна електродинаміка.-2003.-№3.-С. 41-47.  
 [14] 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.  
 [15] Бочков В.Д., Бочков Д.В., Гнедин И.Н. и др. Мощные псевдоискровые коммутаторы для импульсной энергетики // Труды международной научно-технической конференции МИОМ-2007 (Россия, г. Самара, СГАУ, 18-19 сентября 2007).- С. 23-27.  
 [16] Ермилов И.В. Разработка комплекса высоковольтного сильноточного 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.  
 [17] Безуглов В.Г., Беляев С.А., Галахов И.В. и др. Новое поколение мощных полупроводниковых коммутаторов для применений импульсной энергетики // Труды международной научно-технической конференции МИОМ-2007 (Россия, г. Самара, СГАУ, 18-19 сентября 2007).- С. 28-34.  
 [18] Юферов В.Б., Друй О.С., Скибенко Е.И. и др. Сверхпроводящие магнитные системы сложной формы и с высокой плотностью транспортного тока // Электротехніка і електромеханіка.- 2003.- №2.- С. 81-89.

Поступила 04.06.2008