

## ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ КОММУТАТОР МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ ТОКА НА ОСНОВЕ РЕВЕРСИВНО ВКЛЮЧАЕМЫХ ДИНИСТОРОВ ДЛЯ ЕМКОСТНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ НЕОДИМОВОГО ЛАЗЕРА

*В. В. Свиридов, А. Г. Арзев, Е. А. Беспалов, И. А. Бродский, И. В. Галахов, Л. С. Ганин, Е. В. Коженков,  
А. В. Креков, В. И. Лесков, С. Л. Логутенко, В. А. Осин, Д. А. Сенник, М. В. Чистопольский.*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Нижегородская область, пр. Мира, 37, 607188, Россия  
Институт лазерно-физических исследований

### Введение

В настоящее время в России разрабатывается неодимовая лазерная установка мегаджоульного уровня для проведения экспериментальных исследований в области лазерного термоядерного синтеза. Накачка активных элементов силовых лазерных усилителей будет осуществляться с помощью мощных импульсных ксеноновых ламп. Электрическая энергия, необходимая для питания ксеноновых ламп, будет запасаться в емкостном накопителе энергии – конденсаторной батарее (КБ) [1, 2]. Конденсаторная батарея установки строится по модульному принципу. При этом под модулем конденсаторной батареи (МКБ) мы понимаем группу конденсаторов, разряжаемых на нагрузку через один управляемый разрядник. Основные характеристики модуля представлены в табл. 1.

Таким образом, разрядник является ключевым элементом МКБ и должен удовлетворять следующим требованиям: удержание в закрытом состоянии напряжения 24 кВ, способность коммутировать ток 250 кА при длительности импульса 450 мкс.

В качестве коммутаторов в крупных емкостных накопителях применяются разрядники трех основных типов: высокого давления, низкого дав-

ления и твердотельные [3]. Наиболее перспективными считаются твердотельные полупроводниковые разрядники на основе реверсивно включаемых динисторов (РВД), так как обладают следующими преимуществами: малые потери энергии, большой ресурс (~10000 срабатываний), простота обслуживания, компактность, отсутствие задержек срабатывания, экологическая безопасность. Исследования, проведенные ранее в ИЛФИ РФЯЦ ВНИИЭФ, показали возможность коммутации тока с амплитудой 250 кА и длительностью импульса около 400 мкс при помощи данного типа коммутатора [4].

В КБ установки «Луч» успешно используются коммутаторы данного типа, рассчитанные на рабочее напряжение 25 кВ и ток 100 кА, которые с 2001 г. выдержали более 1000 срабатываний [5].

С учетом всех вышеперечисленных преимуществ, а также положительного опыта использования коммутаторов на основе РВД, было принято решение использовать данный тип коммутатора в модуле КБ проектируемой лазерной установки.

РВД-коммутаторы разрабатываются в ОАО «Электровыпрямитель» (г. Саранск) по ТЗ ИЛФИ РФЯЦ ВНИИЭФ для КБ проектируемой установки были созданы на базе реверсивно включаемых динисторов.

Таблица 1

Основные характеристики модуля КБ установки

Зарядное напряжение, кВ	24
Энергия, запасенная в модуле, кДж	900
Количество ламповых контуров в модуле	10
Разрядный ток в ламповом контуре, кА	25
Разрядный ток в модуле, кА	250
Длительность импульса тока (по уровню 0,1 от амплитуды), мкс	450

В данной работе приведены результаты испытаний макетных и опытных образцов высоковольтных коммутаторов тока в условиях работы модуля накопителя.

### Модуль конденсаторной батареи

Для отработки элементов конденсаторной батареи был создан опытный образец модуля. Общий вид модуля представлен на рисунке 1.

Принципиальная электрическая схема модуля КБ представлена на рис. 2. Выбран вариант схемы, в котором коммутатор соединяет высоковольтную обкладку конденсаторов с общей точкой схемы («землей»), а вторая обкладка конденсаторов через кабельную линию соединена с нагрузкой. По такому же принципу построены батареи установок «Луч» [5] и «LMJ» [6, 7]. Достоинством этой схемы является тот факт, что разрядные контура каждой ламповой цепи фактически независимы друг от друга, и при каком-либо отказе в одном контуре разряд в остальных происходит штатным образом.

Схема МКБ включает в себя десять параллельных разрядных контуров. Основными элементами контуров являются: силовые накопительные конденсаторы (С1–С10), токоформирующие ин-

дуктивности (L1–L10), кабельные линии (КН1–КН10) и нагрузка (Rн1–Rн10). Максимальное зарядное напряжение накопительных конденсаторов составляет 24 кВ. В качестве нагрузки модуля использовались резисторы с сопротивлением эквивалентным сопротивлению импульсных ксеноновых ламп типа ИНП 43/1800. Разряд всех десяти контуров происходит через один силовой коммутатор К<sub>о</sub>.

Схема модуля содержит контур предыонизации, основные элементы которого: накопительный конденсатор (С<sub>п</sub>), демпфирующий резистор (R<sub>п1</sub>) и коммутатор К<sub>п</sub>. Контур предыонизации включается параллельно основному разрядному контуру и срабатывает за 200–300 мкс до срабатывания разрядника основного контура. При этом на нагрузку воздействуют два импульса тока: первый малоэнергетичный импульс тока (импульс предыонизации) и второй – основной импульс. Импульс предыонизации предназначен для обеспечения пробоя ламп и создания в них к моменту прихода основного импульса ксеноновой плазмы. Предыонизация ламп увеличивает общую эффективность лазера и стабилизирует пусковые характеристики ламп. Контур предыонизации используется также для проверки (тестирования) ламп между срабатываниями.

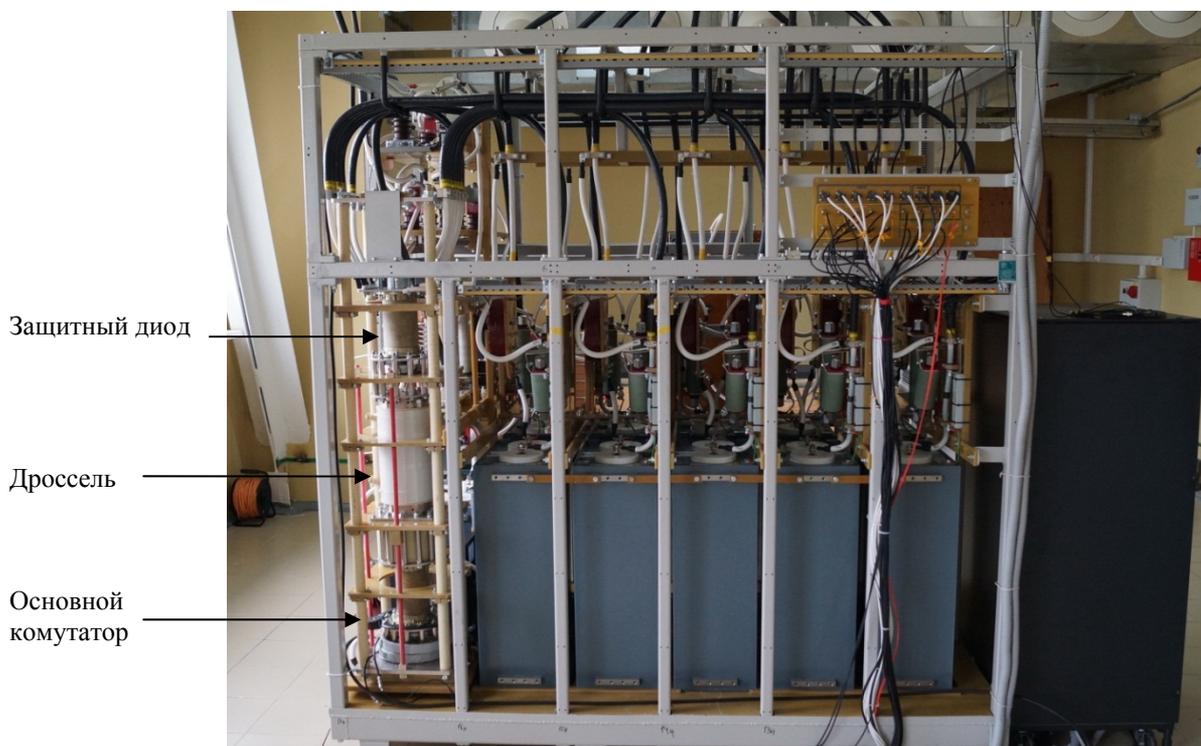


Рис. 1. Общий вид модуля конденсаторной батареи

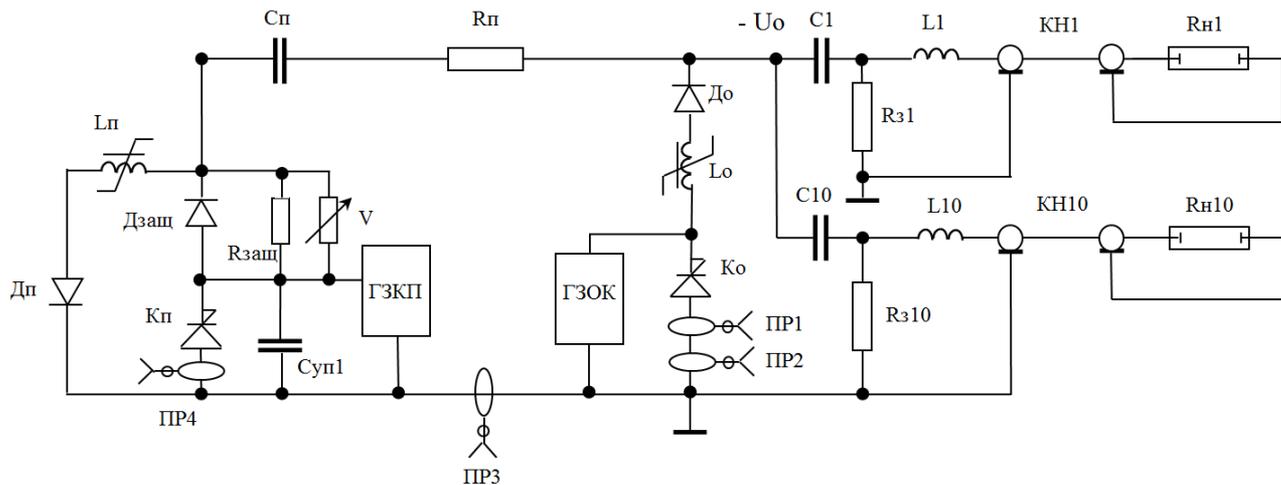


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема модуля КБ.

Обозначения на схеме:  $C_1 \div C_{10} = 290$  мкФ – накопительные конденсаторы основного контура;  $-U_0$  – напряжение заряда накопителя 24 кВ;  $K_0$  – коммутатор основного контура;  $L_0$  – насыщающийся дроссель;  $D_0$  – защитный диод;  $C_п = 60$  мкФ – конденсатор предыонизации;  $K_п$  – коммутатор предыонизации;  $D_п$  – шунтирующий диод предыонизации;  $L_1 \div L_{10} \approx 35$  мкГ – токоформирующие индукторы;  $R_{з1} \div R_{з10} = 1$  кОм – зарядные резисторы;  $KН1 \div KН11$  – кабели;  $R_{н1} \div R_{н10}$  – резистивная нагрузка; ГЗОК – генератор запуска основного коммутатора; ГЗКП – генератор запуска коммутатора предыонизации;  $R_{п1} = 1$  Ом токоограничивающий резистор;  $L_п$  – дроссель предыонизации;  $C_{уп} = 44$  нФ – конденсатор генератора запуска;  $D_{зщ}$  – защитный диод;  $R_{зщ}$  – защитный резистор;  $V$  – варистор; ПР1–ПР4 – пояса Роговского.

Основной коммутатор ( $K_0$ ) встроен в коаксиальную сборку, состоящую из дросселя с насыщающимся сердечником ( $L_0$ ) и защитного диода ( $D_0$ ). Общий вид сборки показан на рис. 1.

Дроссель с насыщающимся сердечником необходим для обеспечения надежного запуска силового РВД-коммутатора [8]. В исходном состоянии и на этапе запуска коммутатора дроссель имеет достаточно большую индуктивность, что препятствует нарастанию силового тока и обеспечивает необходимую величину и длительность тока управления. Примерно через 1,5 мкс под воздействием зарядного напряжения сердечник дросселя быстро перемагничивается и насыщается. Индуктивность дросселя резко уменьшается, силовой ток быстро нарастает. Напряжение прикладывается к коммутатору, который переключается и пропускает ток разряда конденсаторов модуля. Насыщающийся дрос-

сель был создан в ФТИ имени А. Ф. Иоффе (г. Санкт-Петербург) по ТЗ ИЛФИ.

Защитный диод препятствует протеканию через основной коммутатор токов в обратном направлении от импульса предыонизации и в аварийных ситуациях [7]. Диод также защищает коммутатор при возникновении аварийных ситуаций. Диод разработан, как и силовой РВД-коммутатор, в ОАО «Электровыпрямитель» в рамках контракта с РФЯЦ-ВНИИЭФ.

### Принцип действия РВД

Полупроводниковая структура РВД представлена на рис. 3. Она состоит из большого количества чередующихся тиристорных  $p^+Np^+$  и транзисторных  $p^+Np^+$  секций с размерами  $\sim 10^2$  мкм. Центральный (коллекторный)  $N_p$  переход у всех секций общий; он блокирует приложенное к прибору внешнее напряжение. Переключение РВД в проводящее состояние осуществляется кратковременным изменением полярности (реверсом) приложенного напряжения. При этом низковольтный  $pn^+$  переход транзисторных секций работает в режиме лавинного пробоя и через него проходит относительно небольшой ток управления (ток накачки), являющийся обратным по отношению к основному коммутируемому току. Вследствие большой степени интеграции тиристорных и транзисторных секций, накапливаемый при прохождении тока накачки заряд распределяется однородно по всей площади РВД и образует тонкий приколлекторный плазменный слой. При восстановлении на динисторе первоначальной полярности внешнего напряжения этот слой инициирует переключе-

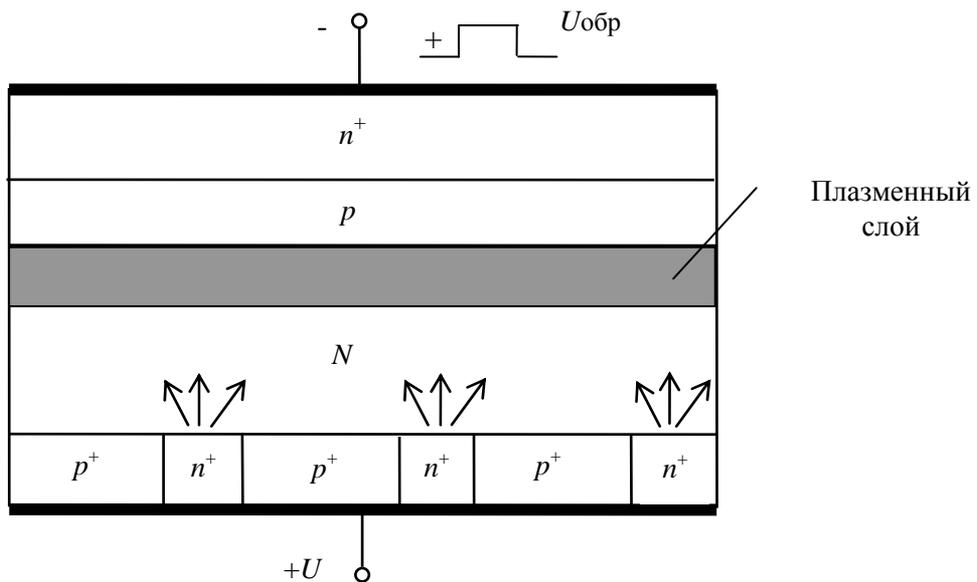


Рис. 3. Схема полупроводниковой структуры РВД

ние тиристорных секций, которое при соответствующем выборе амплитуды и длительности тока накачки происходит однородно по площади и без задержки относительно момента окончания импульса тока накачки [9].

Амплитуда и длительность тока управления выбирается таким образом, чтобы обеспечить пропускание необходимой величины заряда  $Q_H$  в процессе управляющего воздействия. При скорости нарастания основного тока порядка 5 кА в мкс минимальный заряд, который нужно передать с помощью тока управления  $Q_H = 1$  мКл [7].

РВД являются полупроводниковыми приборами тиристорного типа и их прямая вольтамперная характеристика аналогична вольтамперной характеристике тиристора в закрытом состоянии. Таким образом, при приложении к РВД прямого напряжения через него начинает течь небольшой ток (до 100 мкА) – ток утечки. При деградации полупроводниковой структуры ток утечки резко возрастает, что позволяет использовать его в качестве критерия исправности РВД.

### Коммутатор основного контура

Силовой коммутатор основного контура на базе РВД разработан в ОАО «Электровыпрямитель» (г. Саранск) [10]. Его общий вид представлен на рис. 4. Коммутатор представляет собой 15 последовательно соединенных полупроводниковых элементов – реверсивно-включаемых дини-

сторов, находящихся в цилиндрическом корпусе-изоляторе. Он способен удерживать в закрытом состоянии напряжение 24 кВ, коммутировать ток до 240 кА при длительности импульса около 450 мкс.

Для экспериментальных исследований в составе прототипа МКБ было изготовлено 6 макетных и 10 опытных образцов силового коммутатора.



Рис. 4. Конструкция РВД коммутатора основного контура

## Коммутатор предыонизации

Коммутатор предыонизации предназначен для коммутации электрической энергии конденсатора предыонизации в импульсные лампы накачки перед пуском силового коммутатора (примерно за 200–300 мкс) для предварительного пробоя ламп и создания в них ксеноновой плазмы.

Коммутатор предыонизации на базе РВД разработан в ФТИ имени А. Ф. Иоффе (г. Санкт-Петербург) [11]. В настоящее время в ОАО «Электровыпрямитель» (г. Саранск) изготовлено 10 опытных образцов коммутатора. Общий вид коммутатора предыонизации представлен на рис. 5, а на рис. 6 показана его принципиальная электрическая схема.

Коммутатор состоит из диодной сборки D0 и коммутирующего блока РВД0, состоящего из столба РВД и отсекающего диода D. Сверху между сборкой и блоком находится разделительный дроссель L. На переднем плане видны два запускающих конденсатора C<sub>y</sub>, шунтирующий резистор R и варистор V. Сборка D0 состоит из 13 последовательно соединенных диодов Д153-70-20 с диаметром структур 50 мм, сборка РВД0 – из 13 последовательно соединенных РВД153-90-20 с диаметром структур 50 мм. К каждому динистору и к каждому диоду подключены два последовательно соединенных варистора 14N112K, которые ограничивают напряжение на них на уровне 2 кВ.



Рис. 5. Общий вид макетного образца коммутатора предыонизации

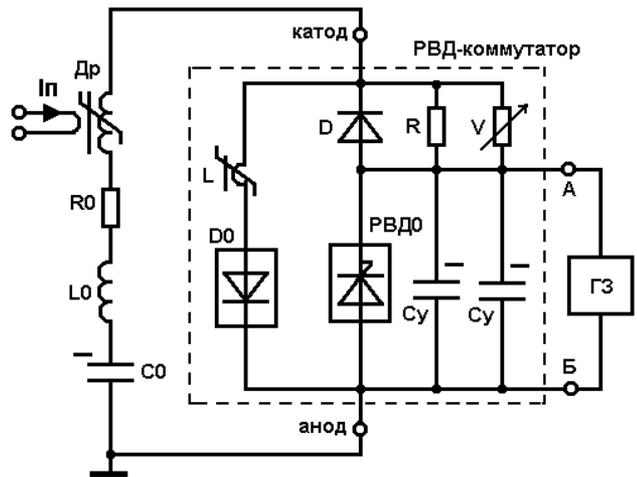


Рис. 6. Принципиальная схема коммутатора предыонизации

Обозначения на схеме: РВД0 – коммутирующий блок; D – отсекающий диод; D0 – диодная сборка; L – разделительный дроссель; C<sub>y</sub> – запускающий конденсатор; R – шунтирующий резистор; V – варистор; C0 – эквивалентная емкость силовых конденсаторов модуля КБ; L0 – эквивалентная индуктивность модуля КБ; R0 – эквивалентное сопротивление МКБ; Др – одновитковый дроссель конструкции ФТИ; ГЗ – генератор запуска.

В качестве запускающих конденсаторов C<sub>y</sub> – К75-63 с емкостью 0,022 мкФ каждый и рабочим напряжением 40 кВ, в качестве резистора R – HVR 851221 с сопротивлением 0,56 Ом, в качестве варистора V – СН2 с классификационным напряжением 1200 В.

Данный коммутатор способен коммутировать знакопеременные импульсы тока с амплитудой до 40 кА и длительность импульса по уровню 0,1 от амплитуды 100 мкс.

## Экспериментальные исследования полупроводниковых коммутаторов

Испытания коммутаторов проходили в составе опытного образца модуля конденсаторной батареи. Основной целью исследований являлась проверка работоспособности основного коммутатора и коммутатора предыонизации в условиях работы модуля конденсаторной батареи при зарядном напряжении 24 кВ и коммутируемом токе 250 кА и 17 кА соответственно.

**Испытания макетных образцов силовых коммутаторов**

Таблица 2

Испытания макетных образцов силовых коммутаторов

Номер коммутатора	Количество срабатываний	Результат
2	1000	норма
3	250	норма
4	187	пробой
6	250+250	норма
8	50	норма
9	100	норма

Испытания макетных образцов силовых коммутаторов проводились на прототипе модуля КБ в режиме работы без предыонизации при зарядном напряжении 24 кВ, коммутируемом токе 250 кА. В качестве нагрузки использовался омический эквивалент. Пауза между срабатываниями составляла 480 с. В каждом срабатывании при помощи поясов Роговского, показанных на рис. 2, и осциллографов измерялись импульсы тока управления и силового тока коммутатора. Основные параметры токов (амплитуды, длительности импульсов, отсутствие реверса и др.) оценивались визуально после каждого срабатывания. Характерные осциллограммы приведены на рис. 7.

Как говорилось выше, в качестве критерия исправности РВД принимаются значения токов утечки. Перед началом работы и после каждых 100 включений производились измерения токов утечки РВД. Для этого с помощью высоковольтного источника заряжалась ёмкость  $C = 0,01$  мкФ включенная параллельно коммутатору до напряжений 5, 10, 15, 20, 24 кВ, и измерялись токи утечки через коммутатор. Значение токов утечки больше 100 мкА говорит о нарушении полупроводниковой структуры и о неудовлетворительном результате испытаний.

Основные результаты испытаний макетных образцов силовых коммутаторов представлены в табл. 2.

Всего на прототипе модуля КБ было испытано 6 макетных образцов. Как видно из таблицы коммутатор № 2 выдержал 1000 включений. Токи утечки данного коммутатора показали, что он исправен и готов к дальнейшей работе. Тем не менее, на заводе-изготовителе после 1000 срабатываний коммутатор был разобран, и все элементы РВД были повторно протестированы. Заводские испытания показали, что какой-либо деградации отдельных элементов не выявлено.

При испытаниях коммутатора № 4 после 187 разрядов произошло самопроизвольное срабатывание на стадии заряда основных емкостей модуля. Токи утечки показали, что коммутатор вышел из строя. Образец № 4 был отправлен на завод изготовитель, где после исследований конструкция коммутатора была модернизирована. Была улучшена система прижима коммутатора, а так же увеличена величина прокладок между элементами РВД.

После модернизации (замена элементов, изменение системы прижима) коммутатор № 6 вы-

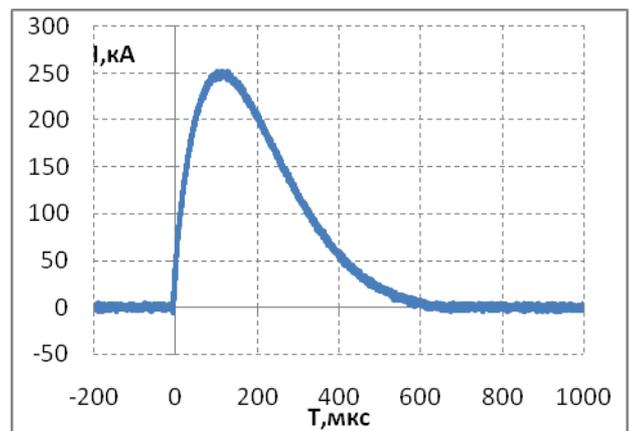
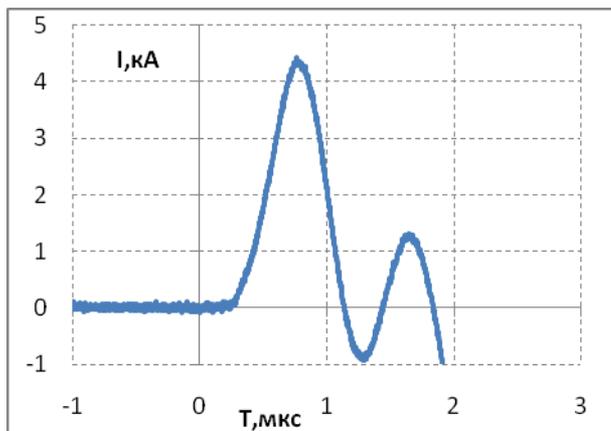


Рис. 7. Осциллограммы импульсов тока запуска основного коммутатора и основного коммутируемого тока

держал 250 включений в штатном режиме и еще 250 включений при повышенном значении разрядного тока – 265 кА. Токи утечки данного коммутатора, измеренные после испытаний, говорят об его исправности и готовности к дальнейшей работе.

### Испытания опытных образцов основного коммутатора и коммутатора предыонизации

После отработки макетных образцов коммутаторов на прототипе модуля КБ в ОАО «Электровыпрямитель» (г. Саранск) была изготовлена партия из 10 опытных образцов силового коммутатора. Данные коммутаторы проходили испытания на опытном образце МКБ вместе с опытными образцами коммутаторов цепи предыонизации, которые также были изготовлены в ОАО «Электровыпрямитель».

Испытания опытных образцов коммутаторов проводились в штатном режиме работы при заряд-

ном напряжении 24 кВ и с использованием контура предыонизации. В качестве нагрузки использовался омический эквивалент. Пауза между срабатываниями составляла 480 с. Коммутировались токи: в основном коммутаторе 250 кА; в коммутаторе предыонизации знакопеременный импульс тока с амплитудами около 17 кА и –17 кА. В каждом срабатывании при помощи поясов Роговского, показанных на рис. 2, и осциллографов измерялись импульсы тока управления и силового тока. Основные параметры токов оценивались визуально после каждого срабатывания. Характерные осциллограммы токов коммутатора предыонизации и основного коммутатора приведены на рис. 8.

На рис. 9 представлена осциллограмма тока в основном коммутаторе аналогичная осциллограмме на рис. 8, но при более короткой развертке. Видно, что скорость нарастания силового тока в момент переключения основного коммутатора составляет около 10 кА в мкс, что в три раза выше, чем в режиме без предыонизации представленном на рис. 7.

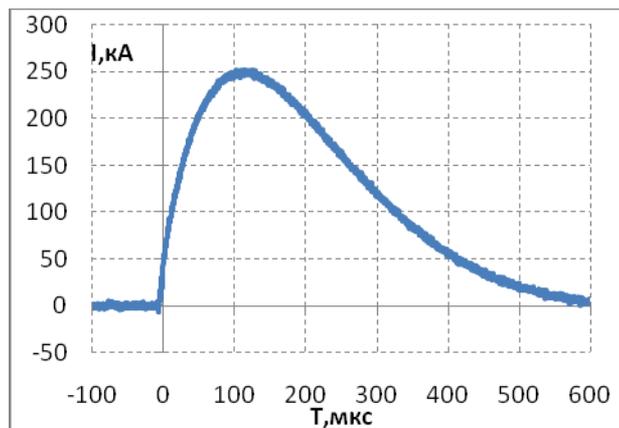
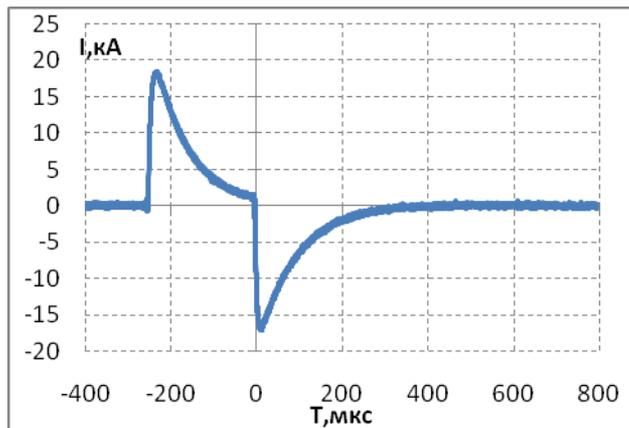


Рис. 8. Осциллограмма импульсов тока коммутатора предыонизации и основного коммутатора

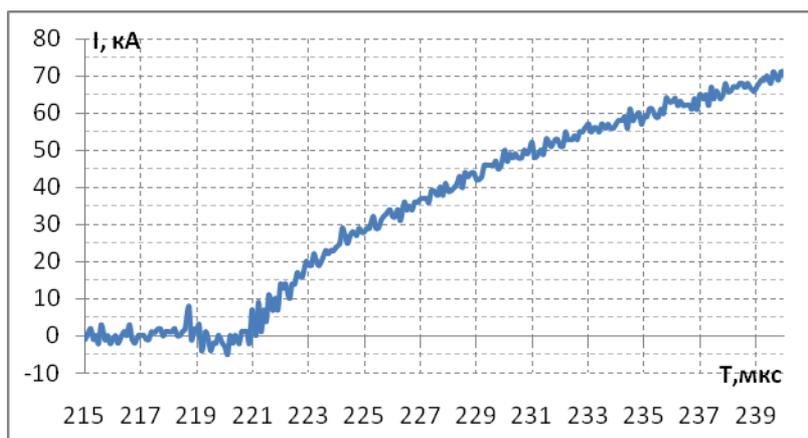


Рис. 9. Осциллограмма тока в основном коммутаторе

Всего было проведено по 50 срабатываний на каждой паре коммутаторов – основного и предъюонизации. С одной из 10 пар было сделано 500 включений в штатном режиме. Измеренные токи накачки коммутаторов после испытаний показали их исправность и говорят в целом о положительном результате экспериментальных исследований.

### Заключение

В данном докладе представлены результаты экспериментальных исследований высоковольтных РВД-коммутаторов в составе опытного образца МКБ на стендах ИЛФИ РФЯЦ ВНИИЭФ.

Приведена схема модуля и описание РВД-коммутаторов основного контура и контура предъюонизации. При рабочем напряжении 24 кВ и токе около 250 кА испытано 6 макетных и 10 опытных образцов РВД-коммутаторов. Показано, что практически все коммутаторы выдержали рабочий режим. Один коммутатор прошел без отказов 1000 включений.

По результатам испытаний, в ОАО «Электровыпрямитель» (г. Саранск) проведена доработка конструкций основного коммутатора

Испытано 10 опытных образцов коммутатора предъюонизации в составе модуля конденсаторной батареи в режиме коммутации знакопеременных импульсов с амплитудами  $\pm 17$  кА. Отказов в работе коммутаторов предъюонизации не зафиксировано.

### Список литературы

1. Galakhov I. V., Garanin S. G., Eroshenko V. A., Kirillov G. A., Kochemasov G. G., Murugov V. M., Rukavishnikov N. N., Sukharev S. A. «Concept of the Iskra-6 Nd-laser facility» // *Fusion Engineering and Design*. 1999. V. 44. pp. 51–56.

2. Galakhov I. V., Garanin S. G., Kirillov G. A., Murugov V. M., Sukharev S. A. “Capacitor bank 120 MJ, 22 kV for high-power Nd-glass laser of facility ISKRA-6: conceptual design.” // *Proc. of XII-th IEEE International Pulsed Power Conference*, Monterey, CA, USA, June 1999, pp. 905–909.

3. Месяц Г. А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004.

4. Chumakov G. D., Galakhov I. V., Gudov S. N., Kirillov G. A., Kovtun V. I., Larson D., Martynenko V. A., Murugov V. M., Osin V. A., Zolotovskii V. I. “Switching of High-Power Current Pulses up to 250 kA and Submillisecond Duration using New Silicon Devices - Reverse Switched Diodes.” // *Proc. of 10-th IEEE International Pulsed Power Conference*, Albuquerque, NM, USA, July 1995.

5. Безуглов В. Г., Галахов И. В., Гаранин С. Г. и др. «Конденсаторная батарея 25 кВ, 5 МДж с полупроводниковыми РВД – коммутаторами для питания импульсных ламп неодимового лазера установки “Луч”», Труды международной конференции X Харитоновские чтения «Мощные лазеры и исследования физики высоких плотностей энергии», Саров, 11–14 марта, 2008, с. 202.

6. Mermel J. M., D. Rubin de Cervens, Marret J. P., Roos V. “Pulsed Power Conditioning System For The Megajoule Laser” // *Proc. of IEEE Pulsed Power and Plasma Science Conference*, 2003, p. 89.

7. Bertier, V. G. Bezuglov, I. V. Galakhov, S. N. Gudov, J.-P. Marret, V. M. Murugov, V. A. Osin, D. Rubin de Cervens, Smetanin M. L., Zolotovskii V. I. “On the possible use of semiconductor RSD-based switch for flashlamps drive circuits in a Nd-glass laser amplifier of LMJ facility”. // *Proceeding of. XIIth IEEE International Pulsed Power Conference*, Monterey, CA, USA, June 1999, pp. 914–918.

8. Коротков С. В. “Коммутационные возможности реверсивно переключаемых диодов и принципы РВД-схемотехники (обзор)” // *ПТЭ*. 2002. № 4. С. 5–39.

9. Тучкевич В. М., Грехов И. В. Новые принципы коммутации больших мощностей полупроводниковыми приборами. Л., Наука, 1988.

10. Патент RU2421840 Высоковольтный полупроводниковый коммутатор тока / Ю. Я. Бродский, И. В. Галахов, Е. А. Копелович, В. А. Мартыненко, В. М. Муругов, В. А. Осин, Ф. А. Флат, Г. Д. Чумаков, В. И. Шуляпов. 2011.

11. Коротков С. В., Аристов Ю. В., Жмодиков А. Л., Козлов А. К., Коротков Д. А. Высоковольтный диодно-диодные коммутаторы мощных знакопеременных импульсов тока // *ПТЭ*. 2014. № 4. С. 61–66.