

РАЗРАБОТКА КОММУТАТОРА МОЩНЫХ ДВУПОЛЯРНЫХ ИМПУЛЬСОВ ТОКА НА ОСНОВЕ РЕВЕРСИВНО ВКЛЮЧАЕМЫХ ДИНИСТОРОВ С ОБРАТНОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ

DEVELOPMENT OF A POWER BIPOLAR CURRENT PULSE COMMUTATOR ON THE BASE OF REVERSE CONDUCTING REVERSE SWITCHED DYNISTORS

*А. Г. Арзев¹, И. В. Галахов¹, Л. С. Ганин¹, А. В. Гришанин², В. В. Елисеев², Е. В. Ирешев¹,
А. Ю. Кабанов¹, А. В. Креков¹, Е. В. Коженков¹, В. И. Лесков¹, В. А. Мартыненко²,
В. Г. Мускатиньев², В. А. Осин¹, С. А. Потанов², В. В. Свиридов¹, Д. А. Сеник¹,
О. В. Фролов², А. А. Ханугин², М. В. Чистопольский¹*

*A. G. Arzev¹, I. V. Galakhov¹, L. S. Ganin¹, A. V. Grishanin², V. V. Eliseev², E. V. Ireshev¹, A. Yu. Kabanov¹,
A. V. Krekov¹, E. V. Kozhenkov¹, V. I. Leskov¹, V. A. Martynenko², V. G. Muscatiniiev², V. A. Osin¹,
S. A. Potapov², V. V. Sviridov¹, D. A. Senik¹, O. V. Frolov², A. A. Kharugin², M. V. Chistopolsky¹*

¹Институт Лазерных Физических Исследований
Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ
607188, Нижегородская обл., г. Саров, пр. Мира, 37,

²Научно-Инженерный Центр Силовых Полупроводниковых Приборов
Публичное Акционерное Общество «Электровыпрямитель», г. Саранск
430001, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Пролетарская, 126,

¹Institute of Laser Physics Research
Russian federal nuclear center – VNIIEF
37 Mira ave., 607188 Sarov, Nizhniy Novgorod region,
²Scientific-Engineering Center of Power Semiconductor Devices
Public Joint-Stock Company «Electrovipryamitel»,
126 Proletarskaya str., 430001 Saransk, Republic of Mordovia,

В ПАО «Электровыпрямитель» (г. Саранск) разработан коммутатор двуполярных импульсов тока с амплитудой до 50 кА на рабочее напряжение до 25 кВ на основе реверсивно-включаемых динисторов с обратной проводимостью (РВДД). Такая разработка позволяет существенно упростить конструкцию коммутатора по сравнению с существующими сборками из силовых полупроводниковых приборов (тиристоров, транзисторов, РВД). В работе приведены результаты испытаний РВДД-коммутатора, который использовался в качестве коммутатора контура предионизации в составе макета модуля системы накопления и коммутации электрической энергии лазерной установки. При рабочем напряжении 24 кВ через РВДД-коммутатор протекали импульсы тока с амплитудой до 25 кА и длительностью около 200 мкс.

A switch of bipolar current pulses with amplitude up to 50 kA for an operating voltage up to 25 kV on the base of reverse conducting reverse-switched dynistors (RCRSD) was developed at the Scientific-Engineering Center of Power Semiconductor Devices Public Joint-Stock Company «Electrovipryamitel». This development allows to simplify considerably a switch design in comparison with existing assemblies of high-power semiconductor devices (thyristors, transistors, RSD). The paper presents the results of tests of the RCRSD-commutator used as a preionization circuit switch in the module of the electric energy storage and switching system on a laser facility. The current pulses with an amplitude of up to 25 kA and a duration of about 200 μ s flowed through the RCRSD-commutator at the operating voltage of 24 kV.

Введение

Для ряда импульсных технологий необходимо за времена от единиц до сотен микросекунд коммутировать мощные двуполярные импульсы

тока с амплитудой в десятки и сотни килоампер. Одним из таких применений является высоковольтный коммутатор тока для системы предионизации импульсных ламп накачки неодимового лазера.

Преионизация повышает эффективность накачки и стабилизирует пусковые характеристики ламп [1]. Контур преионизации используется также для проверки (тестирования) ламп между срабатываниями. Коммутатор в данной системе представляет собой ключевой элемент контура преионизации модуля емкостного накопителя лазера. Он должен работать при напряжении 24 кВ и коммутировать два знакопеременных импульса тока амплитудой до 25 кА с длительностью около 200 мкс.

Известна возможность эффективного использования в режиме коммутации затухающих знакопеременных импульсов тока высоковольтного блока на основе реверсивно-включаемых динисторов (РВД), коммутирующего импульсы прямого тока, с соединенным к нему встречно-параллельно высоковольтного диодного блока, коммутирующего импульсы обратного тока [2].

В данной работе представлена новая версия реверсивно-включаемого динистора (РВДД), оптимизированного для коммутации мощных двуполярных импульсов тока и приведены результаты испытаний опытного образца РВДД-коммутатора в составе модуля накопителя энергии создаваемой в РФЯЦ-ВНИИЭФ лазерной установки.

1. Полупроводниковый коммутатор тока на основе реверсивно включаемых динисторов с обратной проводимостью

1.1. Конструкция РВДД

Стандартный РВД, конструкция которого представлена на рис. 1, *a*, предназначен для коммутации силовых импульсов тока только одной (положительной) полярности [2]. Область обратной проводимости этого прибора минимизирована и предназначена для управления прибором с помощью короткого импульса тока отрицательной полярности. Поэтому РВД имеет достаточно

большие потери энергии при протекании силового тока в обратном направлении, обусловленные сравнительно высоким сопротивлением каналов обратной проводимости. Это обстоятельство до недавнего времени создавало определенные трудности при разработке мощных РВД-коммутаторов для электроразрядных технологий, предполагающих протекание знакопеременных импульсов тока.

Схема коммутатора с подключением параллельно к блоку РВД диодного блока, представленная в работе [2], значительно усложняется в связи с необходимостью принятия мер, исключающих перераспределение тока управления РВД в диодный блок.

Для решения этой проблемы была разработана конструкция реверсивно-включаемого динистора с обратной проводимостью (РВДД) (рис. 1, *b*), обладающая уменьшенными потерями при протекании обратного тока [3]. Конструкция РВДД, представляет собой силовую интегральную схему, состоящую из тиристорных $p^+ - n - p - n^+$ -секций с закороченными шунтами анодным и катодным эмиттерами. В четырехслойную структуру встроены $n^+ - n - p - p^+$ -диоды цилиндрической формы (области 2 на рис. 1), включенные антипараллельно тиристорной структуре, а p^+ -эмиттер четырехслойной структуры дополнительно закорочен анодными n^+ -шунтами, образующими транзисторные $n^+ - n - p - n^+$ -секции (области 3), расположенные вокруг катодных эмиттеров встроенных диодов. В структуре РВДД можно условно выделить три зоны, ответственные за все этапы коммутации двуполярных импульсов тока:

1. секции (2+3) – коммутация тока управления (инжекция управляющей плазмы в n -область);
2. секции (1+3) – включение динистора и коммутация мощного импульса прямого тока;
3. секция (2) – коммутация мощного импульса обратного тока (инжекция управляющей плазмы в n -область).

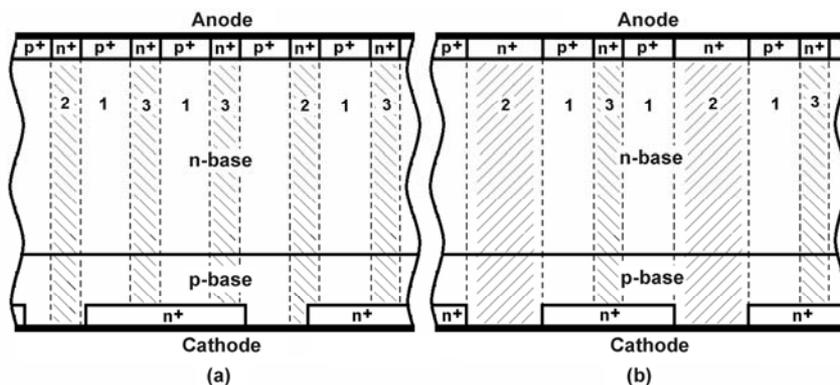


Рис. 1. Конструкция РВД (a) и РВДД (b)

В последнем режиме силовые импульсы обратного тока эффективно выполняют роль тока управления перед коммутацией многократно повторяющихся импульсов прямого тока.

Интегрированные диоды РВДД имеют значительно меньшие падения напряжения при протекании импульса тока обратной полярности по сравнению с квазидиодами в транзисторных секциях (3) и способны пропускать обратные токи сопоставимые с прямыми импульсными токами. Количество равномерно распределенных по площади динистора инверсных диодов может составлять от 2 до 5 тысяч штук на одной Si пластине диаметром 50 мм. Изменяя соотношение площадей диодных и тиристорных секций, путем вариации диаметра и количества встроенных диодов, можно гибко менять максимально допустимые амплитуды положительных и отрицательных полуволн токов. Это позволяет оптимизировать конструкцию РВДД для разных режимов коммутации двухполярных импульсов тока с различными коэффициентами затухания.

1.2. РВДД-коммутатор

В ПАО «Электровыпрямитель» (г. Саранск) разработан и изготовлен опытный образец комму-

татора на ток 50 кА и напряжение 25 кВ на основе РВДД, который позволяет исключить высоковольтный диодный блок и существенно упростить конструкцию коммутатора двухполярных импульсов тока. Внешний вид коммутатора и принципиальная электрическая схема коммутатора показаны на рис. 2 [3].

Новый коммутатор представляет собой высоковольтную сборку, выполненную в виде последовательно соединенных 14-ти таблеточных РВДД диаметром 51 мм, к каждому из которых подключен шунтирующий резистор. Коммутатор управляется блоком запуска, который формирует короткий импульс тока обратной полярности, включающий РВДД управляющим плазменным слоем по реверсивно-инжекционному механизму. После включения коммутатора через него протекают импульсы прямого и обратного тока. Импульсы тока обратной полярности коммутируются в блок РВДД через интегрированные в кремниевые структуры РВДД инверсные диоды, обеспечивая при этом эффективное управление РВДД к моменту коммутации импульсов прямого тока. В результате с помощью высоковольтного блока РВДД в цепь нагрузки коммутируются мощные слабозатухающие двухполярные импульсы тока.

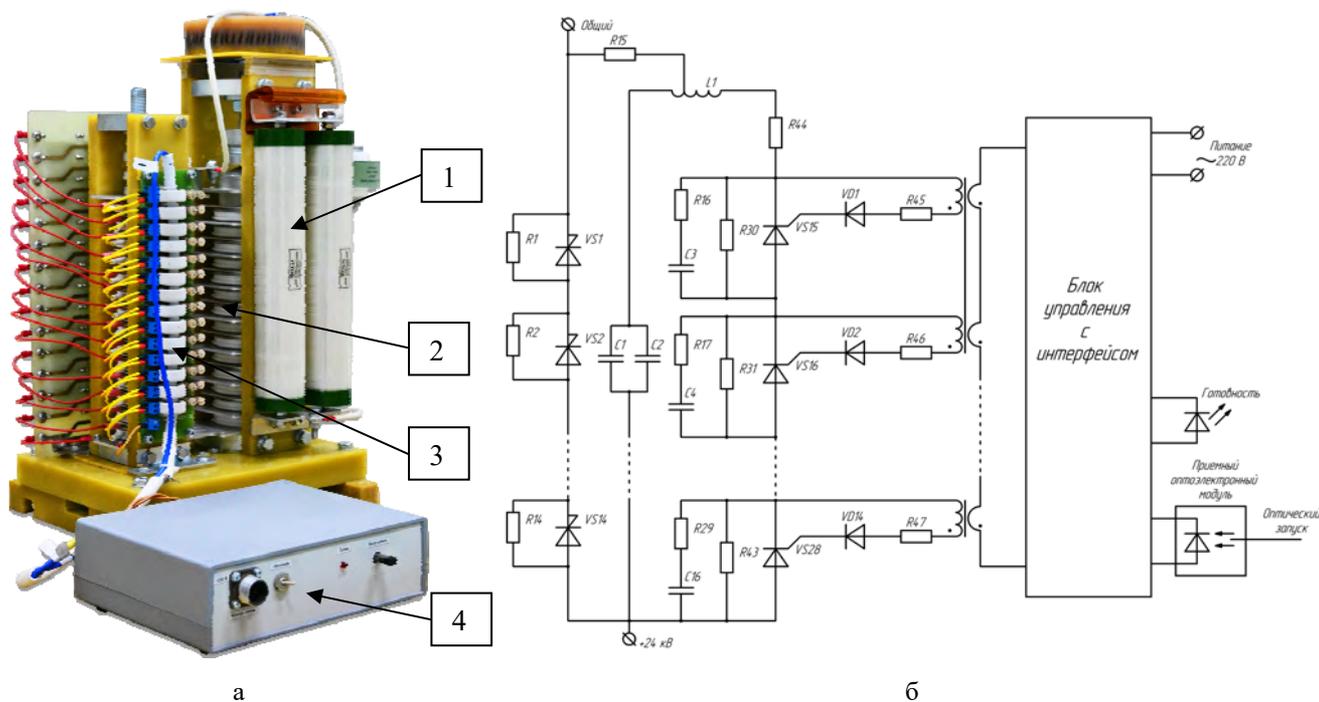


Рис. 2. Внешний вид РВДД-коммутатора с блоком запуска (а), принципиальная электрическая схема (б). Обозначения на схеме: С1, С2 – запускающие конденсаторы (1); VS1–VS14 – сборка РВДД (2); VS15–VS28 – сборка тиристоров в составе блока запуска РВДД (3); блок управления с интерфейсом (4)

2. Испытания РВДД-коммутатора в составе модуля накопителя лазерной установки

2.1. Экспериментальный стенд

Исследование коммутационных возможностей и начальные испытания РВДД-коммутатора про-

ходили на стенде в ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ (г. Саров) в разрядном контуре модуля емкостного накопителя энергии лазерной установки [4]. В табл. 1 приведены основные параметры экспериментального стенда.

Принципиальная электрическая схема стенда представлена на рис. 3 [4].

Таблица 1

Основные параметры экспериментального стенда

Параметр	Значение
Напряжение заряда накопительных конденсаторов, кВ	10...25
Суммарная емкость модуля накопителя энергии, мкФ	~3000
Емкость конденсатора предионизации, мкФ	75
Максимальная запасаемая энергия при $U_{зар.} = 24$ кВ, кДж	864
Количество разрядных цепей модуля накопителя	10
Сопротивление нагрузки единичной разрядной цепи, Ом	~0,5 (омический эквивалент)
Сопротивление резистора в цепи предионизации, Ом	0,5
Максимальная амплитуда тока через коммутатор предионизации, кА	25
Максимальная амплитуда тока через основной коммутатор, кА	250
Длительность импульса тока предионизации (по уровню 0,1 амплитуды), мкс	~200
Длительность импульса силового тока (по уровню 0,1 амплитуды), мкс	450...500

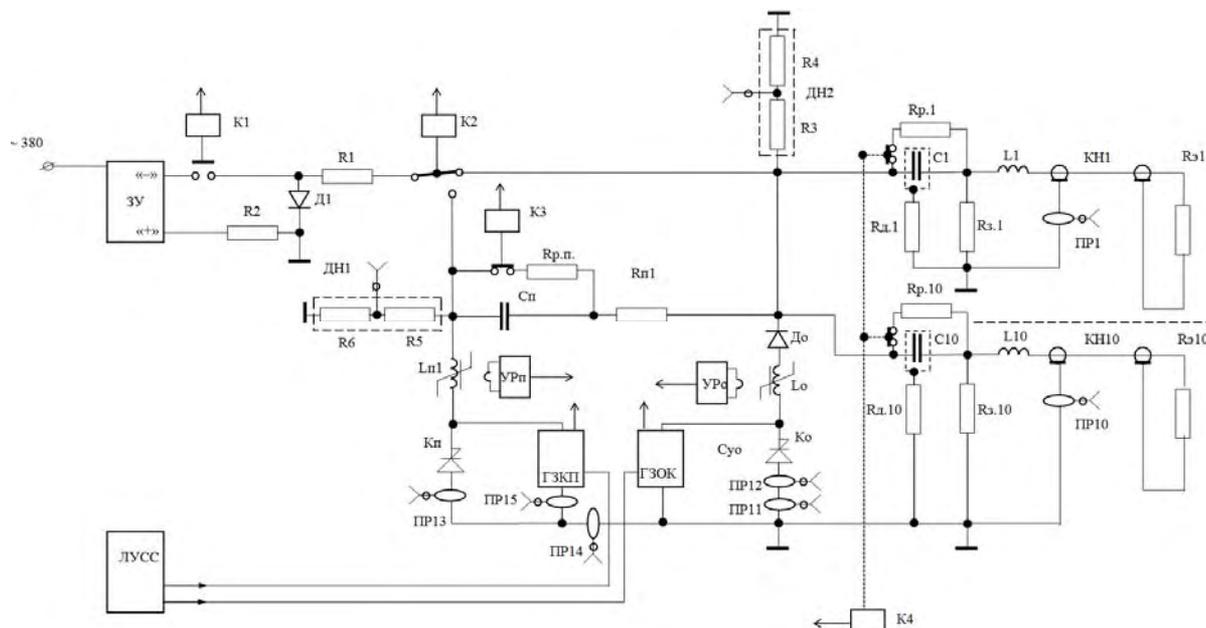


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема высоковольтного стенда. Обозначения на схеме:

С1-С10 – накопительные конденсаторы основного разрядного контура;
 К0 – силовой коммутатор;
 L0, Lп1 – дроссели с насыщающимися сердечниками;
 Уро, УРп – устройства размагничивания дросселей с насыщающимися сердечниками;
 Д1, Д0 – диоды;
 Сп – конденсатор предионизации;
 Кп – коммутатор предионизации;
 L1-L10 – токоформирующие индуктивности;
 Rз.1-Rз.10 – резистивные эквиваленты нагрузки;
 КН1-КН10 – высоковольтные кабели;
 ГЗОК – генератор запуска основного коммутатора;

ГЗКП – генератор запуска коммутатора предионизации;
 Rз.1-Rз.10 – зарядные резисторы;
 Rp.1-Rp.10 – разрядные резисторы;
 Rp.п. – разрядный резистор конденсатора предионизации;
 Rd.1-Rd.10 – дополнительные резисторы;
 Rп1 – согласующий резистор предионизации;
 R1, R2 – резисторы;
 ЗУ – зарядное устройство;
 К1-К3 – высоковольтные переключатели;
 К4 – многоконтактный замыкатель;
 ЛУСС – линейное устройство системы синхронизации;
 ПР1-ПР15 – датчики тока (пояса Роговского);
 ДН1, ДН2 – делители напряжения.

Модуль работает в двух режимах. В тестовом режиме предварительно заряженный конденсатор C_p с помощью коммутатора предионизации K_p разряжается в нагрузку $R_{э1}...R_{э10}$. В основном режиме заряжены конденсаторы $C1...C10$, и при срабатывании коммутаторов K_p и K_o с разновременностью около 250 мкс (K_o срабатывает с задержкой) в нагрузке формируются два импульса тока. При этом через K_p протекают импульсы тока: первый – ток заряда конденсатора C_p по цепям единичных контуров модуля и нагрузки, второй – через ~250 мкс ток разряда конденсатора C_p по цепи включенного коммутатора K_o .

Запуск коммутатора предионизации осуществляется с помощью генератора ГЗКП, построенного по схеме с перезарядом дополнительной емкости и индуктивным накопителем энергии.

Для обеспечения временной задержки (около 1 мкс), требуемой для нормального запуска РВД-коммутатора K_p , последовательно с K_p включен насыщающийся дроссель $L_{п1}$.

При испытаниях РВД-коммутатора предионизации в качестве нагрузки модуля накопителя использовался омический эквивалент с сопротивлением около 0,5 Ом в одном разрядном контуре. Данная величина близка к сопротивлению штатных импульсных ламп накачки создаваемого лазера.

2.2. Результаты испытаний

Испытания РВД-коммутатора проводились при зарядном напряжении 24 кВ в тестовом и основном режимах. В тестовом режиме всего было проведено 33 срабатывания, а в основном режиме – 100 срабатываний. Пауза между испытаниями составляла 10 мин. Перед каждым срабатыванием размагничивался сердечник дросселя $L_{п1}$.

Фотография РВД-коммутатора предионизации с блоком запуска на испытательном стенде приведена на рис. 4.

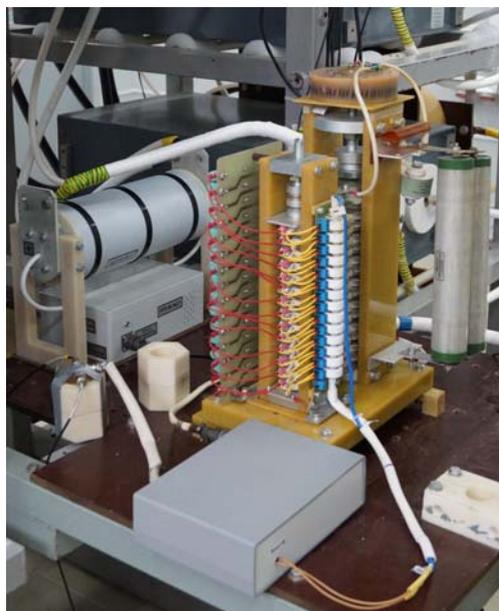


Рис. 4. Внешний вид РВД-коммутатора в составе высоковольтного стенда

При испытаниях в каждом включении с помощью поясов Роговского регистрировались импульсы токов: поясом ПР14 – ток в цепи предионизации (в коммутаторе K_p), поясом ПР13 – ток запуска РВД-коммутатора и поясами ПР11, ПР12 – токи в цепи силового РВД-коммутатора. Для регистрации сигналов использовались цифровые запоминающие осциллографы. Характерные осциллограммы токов запуска и силового тока РВД-коммутатора в тестовом и основном режимах показаны на рис. 5, 6 и 7.

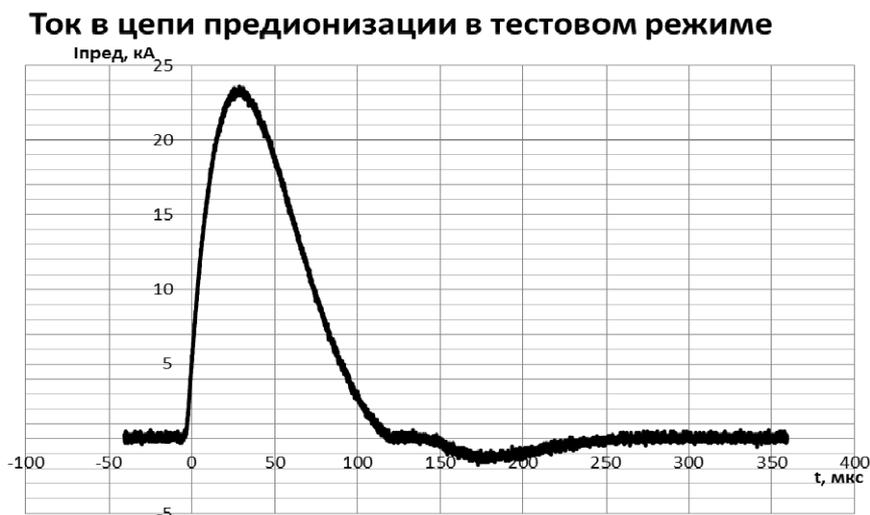


Рис. 5. Осциллограмма тока РВД-коммутатора в тестовом режиме

Ток запуска коммутатора в тестовом режиме

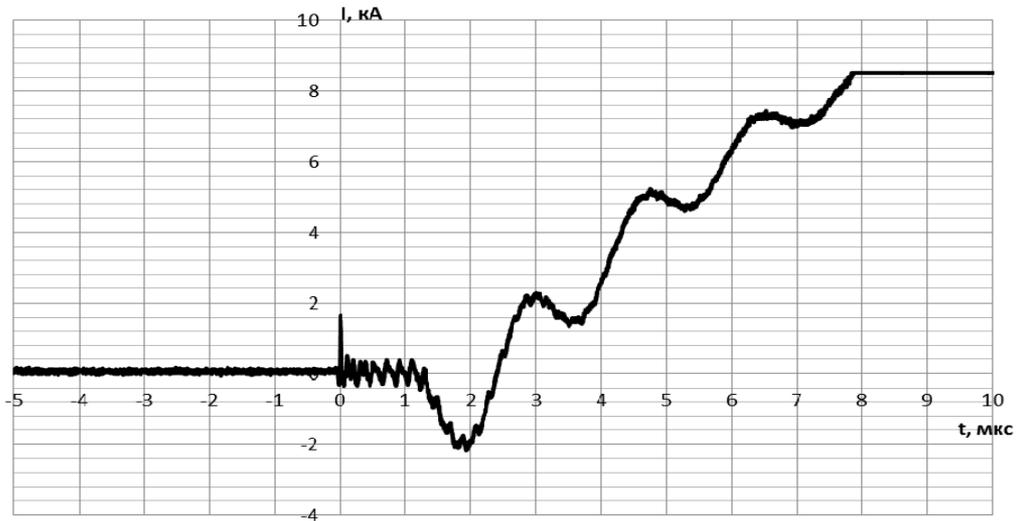


Рис. 6. Осциллограмма тока запуска РВДД-коммутатора

Ток предионизации и силовой ток в штатном режиме

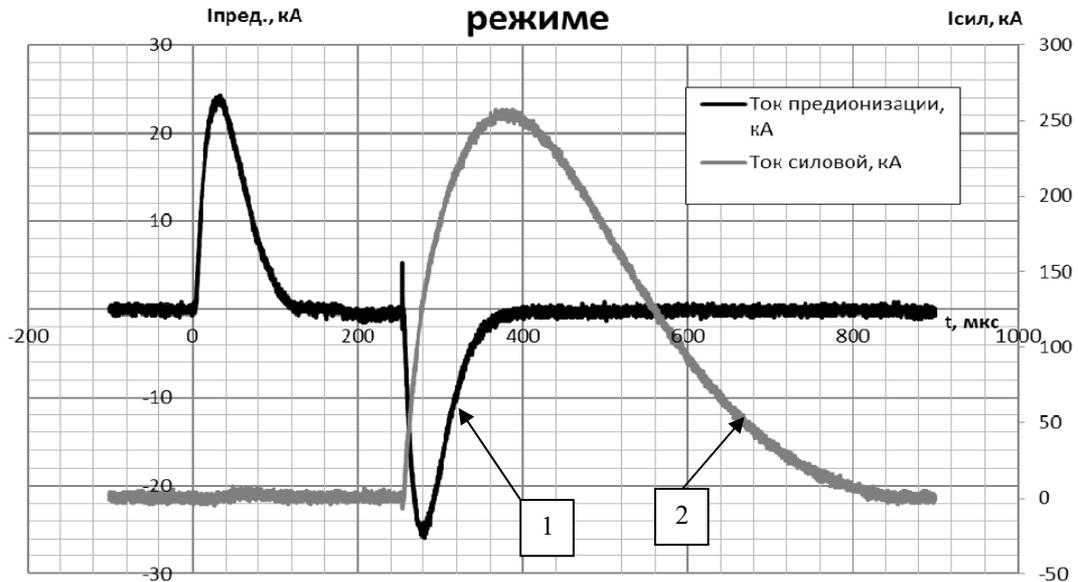


Рис. 7. Осциллограммы токов РВДД-коммутатора предионизации (1) и силового РВД-коммутатора (2) в основном режиме

Из приведенных осциллограмм видно, что в тестовом режиме через РВДД-коммутатор в прямом направлении протекает импульс тока амплитудой около 23 кА длительностью около 120 мкс. В основном режиме коммутатор предионизации коммутирует два импульса тока в прямом и обратном направлениях амплитудой 22–24 кА длительностью около 120 мкс. Ток запуска коммутатора составляет около 2 кА длительностью примерно 1 мкс, что является нормой для РВД такого типа.

Заключение

Опытный образец РВДД-коммутатора предионизации прошел испытания на стенде ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ в составе макета модуля накопителя создаваемой лазерной установки. При рабочем напряжении 24 кВ в основном режиме работы модуля сделано 100 срабатываний. Через РВДД-коммутатор протекали два знакопеременных импульса тока амплитудой ~24 кА длительностью около 120 мкс. Испытания прошли успешно, сбоев в работе нового РВДД-коммутатора не зарегистрировано. В дальнейшем планируются ресурсные

испытания коммутатора в штатных условиях работы модулей накопителя.

Список литературы

1. Арзев А. Г., Галахов И. В., Осин В. А., Свиридов В. В. Влияние режима предионизации на электрофизические характеристики мощных импульсных ксеноновых ламп // Сборник докладов XI научно-технической конференции «Молодежь в науке» / Секция «Экспериментальная физика». 2012. С. 363–368.

2. Коротков С. В., Аристов Ю. В., Жмодиков А. Л. и др. Высоковольтные диодно-динистор-

ные коммутаторы мощных знакопеременных импульсов тока // Приборы и техника эксперимента. 2014, № 4. С. 61–66.

3. Пат. РФ 171465. Реверсивно-включаемый динистор с обратной проводимостью / А. А. Хапугин, В. А. Мартыненко, В. В. Елисеев, А. В. Гришанин, О. В. Фролов. 2016.

4. Ганин Л. С., Арзев А. Г., Беспалов Е. А. и др. Модуль емкостного накопителя с запасенной энергией 900 кДж на базе реверсивно включаемых динисторов для питания ламп накачки мощного неодимового лазера // Сборник докладов международной конференции «XVIII Харитоновские тематические научные чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии». 2016. Т. 2. С. 55–62.