

На правах рукописи

**ЖМОДИКОВ Александр Леонидович**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ УСТРОЙСТВ НА  
ОСНОВЕ КРЕМНИЕВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ**

01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук

Научный руководитель:

Коротков Сергей Владимирович, доктор технических наук,  
заведующий лабораторией ФТИ им. А. Ф. Иоффе

Официальные оппоненты:

Фролов Владимир Яковлевич, доктор технических наук, профессор Высшей школы электроэнергетических систем Института энергетики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Санкт-Петербургского Политехнического Университета Петра Великого (ФГАОУ ВО СПбПУ).

Галахов Игорь Владимирович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института лазерно-физических исследований Федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» (ИЛФИ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»).

Ведущая организация:

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова» (АО «НИИЭФА»).

Защита состоится «\_\_» сентября 2022 г. в \_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 999.137.03 на базе Института электрофизики и электроэнергетики Российской Академии наук (ИЭЭ РАН) по адресу: 191186, г. Санкт-Петербург, Дворцовая наб., д.18, ИЭЭ РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЭЭ РАН и на сайте <http://ieeras.ru/>  
Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 999.137.03  
кандидат технических наук

Киселев А.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Импульсные устройства, обеспечивающие коммутацию в физическую нагрузку мощности десятки и сотни мегаватт за время от сотен наносекунд до сотен микросекунд, широко используются в различных областях современной экспериментальной физики и техники, в частности, для питания импульсных лазеров и аэродинамических труб, в установках импульсного ускорения масс, в системах электроразрядной очистки сточных вод и атмосферного воздуха, в генераторах сильных магнитных полей и мощных ударных волн.

Быструю коммутацию больших электрических мощностей традиционно обеспечивают сравнительно недорогие электроразрядные ключи: управляемые разрядники, игнитроны, тиратроны и т.д. Однако современные мировые тенденции обуславливают переход к доминирующему использованию полупроводниковых ключей, известными достоинствами которых являются бесшумность в эксплуатации, мгновенная готовность к работе и экологическая безопасность.

В этой связи задачи диссертационной работы, заключающиеся в разработке и исследовании мощных импульсных устройств на основе известных и новых полупроводниковых приборов, являются важными и актуальными.

**Цель работы:** модернизация полупроводниковых импульсных устройств на основе биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT), силовых тиристоров (СТ), импульсных интегральных тиристоров (ИИТ) и реверсивно включаемых динисторов (РВД) с целью получения новых возможностей их использования.

**Объектом исследований** являются процессы формирования мощных микро- и субмикросекундных импульсов.

**Предметом исследований** являются коммутаторы на основе кремниевых полупроводниковых приборов (IGBT, СТ, ИИТ и РВД).

### Методы исследований

Исследования проводились традиционными методами. Для измерения параметров электрических импульсов микросекундной и субмикросекундной длительности использовались широкополосные осциллографы Tektronix TDS3052B и DPO5204, высоковольтные делители напряжения Tektronix P5100A и P6015A и датчики тока Pearson current monitor 410 и CWT 600R фирмы PEM.

### Научные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанные способы построения малогабаритных ключей на основе IGBT, СТ, и ИИТ позволяют эффективно использовать эти приборы в нетрадиционном для них режиме коммутации мощных импульсов тока с субмикросекундным фронтом.
2. Разработанный способ генерации микросекундных импульсов напряжения обеспечивает высокую эффективность использования отраженной от нагрузки энергии без применения традиционных дополнительных цепей рекуперации и позволяет разрабатывать на его основе генераторы электрических разрядов в газе и жидкости, эффективность которых составляет не менее 96% в широком диапазоне изменения сопротивления нагрузки, включая короткое замыкание.
3. При уменьшении длительности тока управления с традиционного микросекундного диапазона до субмикросекундного эффективность процесса переключения РВД практически не уменьшается, если обеспечивается близкий по величине запускающий заряд, вносимый током управления, что позволяет значительно уменьшить размеры и индуктивность дросселя, используемого для разделения цепи управления и силовой цепи в устройствах на основе РВД.
4. При использовании разработанных цепей управления РВД-ключи имеют очень малые коммутационные потери энергии в нетрадиционном для них субмикросекундном диапазоне и обеспечивают уникальное для полупроводниковых устройств сочетание высокой амплитуды коммутируемых импульсов тока (десятки и сотни кА) и высокой скорости их нарастания (до 40 кА/мкс).
5. Модифицированная конструкция РВД позволяет в 2,2 раза уменьшить падение напряжения на РВД при протекании обратного тока при незначительном увеличении падения напряжения (~15%) в процессе протекания прямого тока по сравнению с базовым РВД.
6. Разработанные схемы РВД-генераторов позволяют осуществить генерацию знакопеременных импульсов тока с амплитудой десятки и сотни кА, что ранее было недоступно по причине большого падения напряжения на РВД при протекании обратного тока.

### Научной новизной обладают:

- результаты исследований IGBT-транзисторов, силовых тиристоров и импульсных интегральных тиристоров, показывающие возможность существенного уменьшения

коммутационных потерь энергии в малоизученных режимах коммутации мощных импульсов силового тока, нарастающих со скоростью десятки кА/мкс;

- результаты исследований модернизированных РВД, показывающие, что падение напряжения на них при протекании обратного тока в 2,2 раза меньше, чем на базовых РВД;
- схемотехнические решения, обеспечившие возможность построения РВД-генераторов слабозатухающих знакопеременных импульсов тока с амплитудой десятки кА, что ранее было недоступно вследствие малых коммутационных возможностей РВД при пропускании через них тока в обратном направлении;
- разработанная схема генератора электрических разрядов, которая обеспечивает КПД не менее 96% в широком диапазоне изменения сопротивления нагрузки, включая короткое замыкание;
- результаты исследований мощных РВД, свидетельствующие о том, что их коммутационные возможности в режиме коммутации субмикросекундных импульсов тока существенно превосходят возможности тиристоров с той же площадью полупроводниковой структуры;
- схемотехнические и конструктивные способы построения РВД-коммутаторов с рабочим напряжением десятки кВ, которые обеспечивают возможность их эффективного использования в различных электрофизических установках при коммутации импульсов тока с амплитудой сотни кА и скоростью нарастания десятки кА/мкс.

**Практическая значимость** проведенных исследований заключается в том, что разработаны мощные импульсные устройства, которые были использованы в различных электрофизических установках в России: Саровский ФТИ Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», АО НИИЭФА им. Д. В. Ефремова (г. Санкт-Петербург), ИЛФИ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» (г. Саров), НИЦ СПП ПАО «Электровыпрямитель» (г. Саранск), ИЭЭ РАН (Санкт-Петербург) и за рубежом: в Бельгии (Universiteit Antwerpen), в Китае (Biological & Medical Engineering Institute of Chinese Academy of Medical Science, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Hebei Semiconductor Research Institute, Laser Fusion Research Center of Chinese Academy of Engineering Physics, Hebei Junchi Concrete Co., Ltd.) и в США (North Carolina State University).

**Личный вклад автора** состоит в том, что основные результаты диссертационной работы получены лично им или при его непосредственном участии. Автором были разработаны стенды для исследования IGBT, СТ, ИИТ и РВД и мощных коммутаторов на их основе. С его участием модернизированы ИИТ и РВД, что позволило уменьшить коммутационные потери

энергии, разработаны полупроводниковые устройства, способные эффективно коммутировать мегаваттные импульсные мощности в микро- и субмикросекундном диапазоне, проведено их экспериментальное исследование.

#### **Научные публикации**

Основные результаты работы докладывались на следующих международных конференциях: XII Международная конференция по генерации мегагауссных магнитных полей и родственными экспериментам (Новосибирск, Россия, 13-18 июля 2008 г.), 4<sup>th</sup> Euro-Asian Pulsed Power Conference (Karlsruhe, Германия, 30 сентября - 4 октября 2012 г.), 8<sup>th</sup> Euro-Asian Pulsed Power Conference (Biarritz, Франция, 29 августа - 2 сентября 2021 г.), International Scientific Electric Power Conference (Санкт-Петербург, Россия, 17-19 мая 2021 г.), International Scientific Conference on Electrical Engineering 2021 (Санкт-Петербург, Россия, 20-21 мая 2021 г.).

По теме диссертации опубликовано 17 научных работ в рецензируемых научных изданиях и журналах, список публикаций приведен в конце автореферата.

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы. Содержит 131 страницу машинописного текста и 126 рисунков. Список использованной литературы включает 89 наименований.

#### **Основное содержание работы**

**Во введении** формулируется цель работы, обосновывается её актуальность и научная новизна, показывается практическая значимость выносимых на защиту результатов и кратко излагается содержание диссертационной работы.

**В главе 1** рассмотрены перспективы использования в мощных импульсных устройствах традиционных электроразрядных и полупроводниковых ключей, а также разработанных в ФТИ им. А. Ф. Иоффе интегральных тиристоров и реверсивно включаемых динисторов.

**В главе 2** описаны исследования коммутаторов на основе IGBT-транзисторов, силовых тиристоров и импульсных интегральных тиристоров в нетрадиционных для этих полупроводниковых приборов режимах коммутации мощных импульсов тока с субмикросекундным фронтом нарастания.

В разделе 2.1 приведены результаты экспериментов, свидетельствующие о том, что при использовании блока управления с выходным током, имеющим амплитуду >7 А и фронт <50 нс, малогабаритные IGBT типа IRG650B120KD с предельно допустимым напряжением 1,2

кВ могут эффективно коммутировать микросекундные импульсы тока с субмикросекундным фронтом и амплитудой  $\sim 500$  А, которая почти на порядок превышает предельно допустимое паспортное значение рабочего тока (60 А). Показано, что при микро- и субмикросекундной длительности импульсов запуска разброс моментов включения и выключения исследуемых IGBT очень мал ( $< 2$  нс), что определяет возможность их использования при последовательном соединении без применения специальных цепей, ограничивающих напряжение на каждом транзисторе. В этом разделе описан мощный коммутатор с рабочим напряжением 8 кВ, состоящий из восьми последовательно соединенных IRG60B120KD. На частоте 200 Гц он способен коммутировать колоколообразные импульсы тока с амплитудой  $\sim 220$  А, длительностью  $\sim 1$  мкс и фронтом  $\sim 200$  нс и прямоугольные импульсы тока с амплитудой  $\sim 50$  А, длительностью до 1,5 мкс и фронтом  $\sim 50$  нс. Показано, что в этих режимах эффективное управление последовательно соединенными IGBT может быть обеспечено с помощью разработанного блока управления БУ (рис. 1) на основе малогабаритных повышающих трансформаторов Тр с одним витком в первичной обмотке. Высокая скорость нарастания токов управления транзисторов Т обеспечивалась сравнительно высоким напряжением зарядки конденсатора С (800 В). Резистор R имел достаточно большое сопротивление (20 Ом) и исключал существенное влияние трансформаторных цепей на процесс включения транзисторов Т.

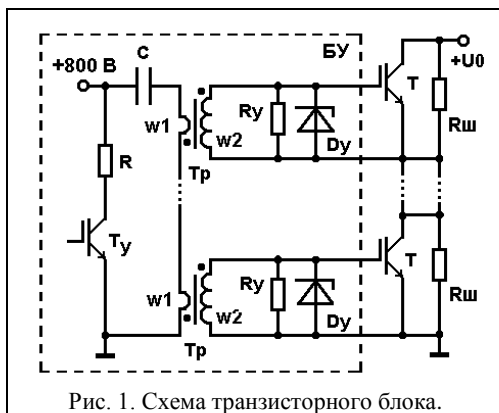


Рис. 1. Схема транзисторного блока.

После включения  $T_y$  в первичные обмотки  $w_1$  коммутируется импульс тока с амплитудой  $\sim 40$  А и фронтом  $\sim 40$  нс. В результате амплитуда импульсов тока через пятивитковые вторичные обмотки составляет  $\sim 8$  А, и на затворах транзисторов Т формируются быстро нарастающие импульсы запускающего напряжения. Амплитуда этих импульсов ограничивается на допустимом уровне ( $\sim 20$  В)

стабилитронами  $D_y$ . Выбранные параметры трансформаторов обеспечивают длительность импульсов запуска транзисторов не менее 1,5 мкс.



Рис. 2. Блок транзисторов IGBT.

На рис. 2 приведена фотография разработанного IGBT-ключа. Ферритовые сердечники Тр закреплены соосно, что позволило пропустить по центру сердечников надежно изолированный виток первичной обмотки. Элементы  $R_y$ ,  $D_y$  располагаются на обратной стороне печатной платы на минимальном расстоянии от выводов транзисторов Т.

В разделе 2.2 приведены результаты исследований коммутаторов мощных импульсов тока с субмикросекундным фронтом на основе выпускаемых в АО "Протон-Электротекс" (г. Орёл) малогабаритных силовых тиристоров ТБ133-250-24, способных блокировать напряжение до 2,4 кВ и пропускать ток со средним значением до 250 А. Показано, что при создании импульсов тока управления с амплитудой  $> 3$  А и фронтом  $< 300$  нс ТБ133-250-24 способны эффективно коммутировать микросекундные импульсы силового тока с амплитудой несколько кА, нарастающие со скоростью несколько кА/мкс. Установлено, что величина разброса моментов включения тиристоров достигает минимального значения ( $\sim 80$  нс) при амплитуде тока управления более 6 А.

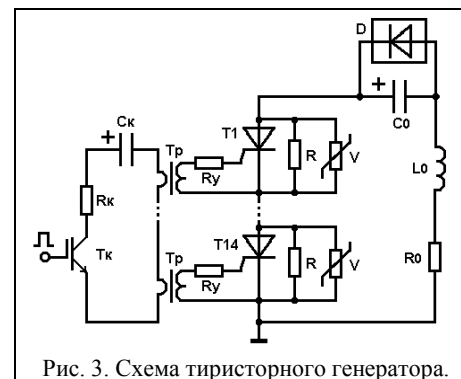


Рис. 3. Схема тиристорного генератора.

В этом разделе описан генератор мощных микросекундных импульсов с коммутатором в виде блока из 14 последовательно соединенных ТБ133-250-24, способный при силовом напряжении 24 кВ коммутировать импульсы тока с амплитудой 4 кА и фронтом 600 нс. Электрическая схема генератора и фото блока приведены на рис. 3 и рис. 4.

Трансформаторная цепь управления обеспечивает коммутацию во вторичные обмотки Тр импульсов тока с амплитудой  $\sim 6$  А и фронтом 300 нс. Варисторы V ограничивают всплески напряжения на тиристорах, обусловленные небольшим разбросом моментов их включения.

В разделе 2.3 рассмотрены результаты исследований коммутаторов мощных быстро нарастающих импульсов тока на основе ИИТ, выпускаемых АО «ВЗПП-Микрон» (г. Воронеж). Эти тиристоры были разработаны в ФТИ им. А. Ф. Иоффе для использования в мощных преобразователях DC/AC в качестве альтернативы IGBT. Целью исследований являлось определение предельных возможностей ИИТ в нетрадиционных режимах коммутации очень коротких быстро нарастающих импульсов силового тока. Основным отличием ИИТ (рис. 5) от традиционных тиристоров является очень малая толщина р-базы. Высокая степень интеграции участков катодного эмиттера разбивает структуру ИИТ на множество тиристорных ячеек. Такая конструкция позволяет обеспечить малые потери энергии при включении ИИТ и его быстрое выключение, которое осуществляется в результате выноса остаточной плазмы после окончания импульса силового тока путем замыкания цепи «электрод управления У - катод К» внешним низковольтным полевым транзистором Т с очень малым электрическим сопротивлением.

В этом разделе приведены результаты сравнительных исследований базовых и модифицированных ИИТ, в которых в прилегающих к р-базе областях были созданы участки с небольшим омическим сопротивлением, которые позволяли обеспечить более равномерное распределение тока управления по тиристорным ячейкам.



Рис. 4. Блок тиристоров.

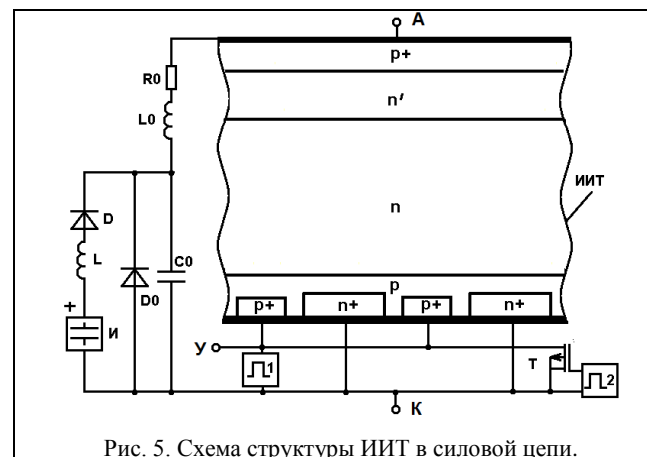
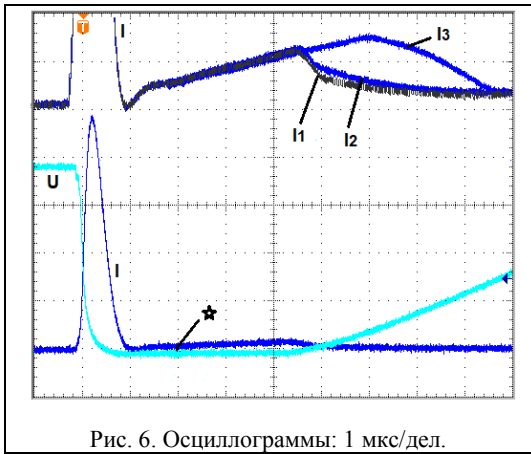


Рис. 5. Схема структуры ИИТ в силовой цепи.

было установлено, что в моноимпульсном режиме они способны коммутировать микросекундные импульсы тока с амплитудой  $\sim 3$  кА и фронтом 200 нс.

Приведены результаты использования этих ИИТ в частотном режиме на стенде, собранном по схеме на рис. 5, показывающие возможность коммутации на частоте 50 кГц пакетов из 10 импульсов тока с амплитудой  $\sim 2,7$  кА и фронтом  $\sim 800$  нс, следующих с частотой 100 Гц. В этом стенде включение ИИТ производилось запускающим сигналом 1, который подавался между катодом К и электродом управления У. После включения через ИИТ протекал силовой ток разряда конденсатора  $C_0$  (I) с амплитудой 500 А. Принудительное выключение ИИТ осуществлялось с помощью транзистора Т, который включался сигналом 2 спустя  $\sim 1$  мкс после окончания тока I. Момент приложения сигнала 2 обозначен (\*). Он совпадает с моментом окончания сигнала 1. Полученные осциллограммы напряжения U на ИИТ (500 В/дел) и тока I (100 А/дел) приведены на рис. 6. После окончания тока I через ИИТ протекает ток источника И. В момент выключения ИИТ этот ток резко обрывается и коммутируется в цепь конденсатора  $C_0$ . В результате происходит зарядка  $C_0$ , и напряжение на ИИТ нарастает. Время выключения ИИТ, определяемое как интервал с момента включения транзистора Т (момент \*) до момента нарастания напряжения U, составляет не более 2 мкс.

Показано, что модернизированные ИИТ имеют существенно меньшее падение напряжения при резком нарастании силового тока. При исследовании модернизированных ИИТ с предельно допустимым напряжением 2,5 кВ и площадью структур  $\sim 1$  см<sup>2</sup>

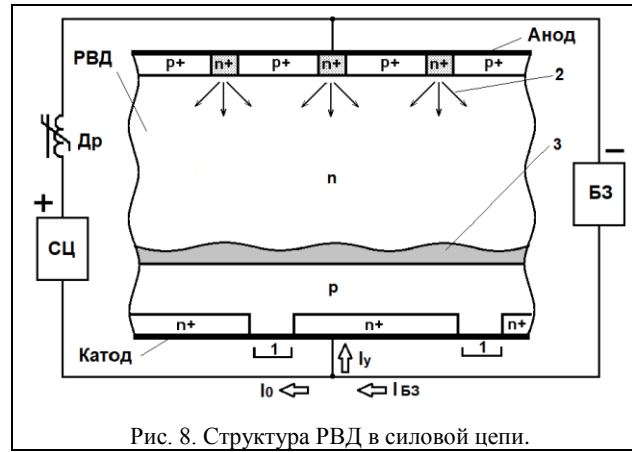


Осциллограммы токов  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  (15 А/дел) иллюстрируют процесс выключения ИИТ при использовании транзистора Т с сопротивлением канала соответственно 3,8 мОм, 56 мОм, и 150 мОм. Полученные результаты свидетельствуют о том, что для быстрого выключения ИИТ величина этого сопротивления должна быть не более нескольких десятков мОм.

В этом разделе описан малогабаритный коммутатор с рабочим напряжением 25 кВ, состоящий из 14 последовательно соединенных ИИТ. Он был собран по схеме на рис. 3. Фотография коммутатора показана на рис. 7. При слабом обдуве воздухом он обеспечил коммутацию импульсов тока с амплитудой ~2,7 кА и фронтом ~800 нс, следующих с частотой 100 Гц. Коммутатор состоял из печатных плат, каждая из которых содержала трансформаторную цепь запуска и ИИТ в корпусе SOT-227 (на фото он внизу слева).



В главе 3 описаны исследования коммутаторов на основе реверсивно включаемых динисторов (РВД) в нетиповых импульсных режимах. РВД были разработаны в ФТИ им. А. Ф. Иоффе специально для использования в мощных импульсных устройствах с высокими скоростями нарастания силовых токов. Их основным достоинством являются малые коммутационные потери энергии вследствие однородного по площади включения. Для включения РВД (рис. 8) к нему с помощью блока запуска БЗ прикладывается небольшое обратное напряжение. В результате через шунты  $n^+$  в  $n$ -базу поступают потоки электронов (2). Они образуют каналы обратной проводимости, через которые протекает ток управления  $I_y$ . Поскольку шунты  $n^+$  расположены на небольшом расстоянии друг от друга, то ток  $I_y$  распределяется практически равномерно по всей площади РВД.



В процессе протекания тока  $I_y$  создается слой запускающих носителей 3, который при восстановлении на РВД исходной полярности напряжения инициирует его включение сразу по всей площади и без задержки относительно момента окончания тока  $I_y$ . Включение РВД проходит с малыми потерями энергии, если запускающий заряд, накопленный в слое 3, достаточно велик и не растрачивается полностью в течение переходного процесса переключения. После коммутации силового тока  $I_0$  выключение РВД осуществляется в результате рекомбинации накопленной электронно-дырочной плазмы. При включении блока БЗ большая индуктивность разделительного дросселя Др препятствует резкому нарастанию тока  $I_0$ , и ток  $I_y$  фактически равен току  $I_{БЗ}$ . В процессе протекания тока  $I_y$  к Др прикладывается силовое напряжение. Спустя короткий интервал времени  $\Delta T$  сердечник Др насыщается, и индуктивность дросселя резко уменьшается. В результате ток  $I_0$  быстро нарастает, а ток управления ( $I_y = I_0 - I_{БЗ}$ ) резко падает до нулевого значения. Основной недостаток РВД-устройств определяется необходимостью использования разделительного дросселя Др. После насыщения сердечника он имеет сравнительно большую индуктивность  $L_{др}$ , которая, как правило, ограничивает  $dI_0/dt$  на уровне, который ниже предельного для используемых РВД. Величина  $L_{др}$  может быть уменьшена путем уменьшения габаритов Др и числа витков его обмотки, но при этом будет уменьшаться задержка резкого нарастания силового тока, определяющая длительность тока управления РВД. При малой величине  $\Delta T$  для эффективного переключения РВД необходима большая амплитуда тока управления. Так, для РВД с диаметром несколько см при  $\Delta T < 1$  мкс она превышает 1 кА. До недавнего времени разработка малогабаритных БЗ на основе полупроводниковых ключей, способных в субмикросекундном диапазоне коммутировать килоамперные импульсы тока, была возможна только при использовании импортных IGCT-тиристоров, имеющих высокую

стоимость. Поэтому переключение мощных РВД осуществлялось при микросекундной длительности импульсов тока управления.

В разделе 3.1 описаны РВД-коммутаторы, переключаемые мощными субмикросекундными импульсами тока управления, которые формируются с помощью разработанных малогабаритных ключей на основе отечественных силовых тиристоров (СТ), недорогих IGBT-транзисторов и интегральных импульсных тиристоров (ИИТ). Приведены результаты исследований выпускаемых в НИЦ СПП ПАО «Электровыпрямитель» (г. Саранск) РВД с рабочим напряжением 2 кВ и диаметром структур 50 мм. Показано, что при коммутации быстро нарастающих импульсов тока с амплитудой  $\sim 10$  кА коммутационные потери энергии в исследуемых РВД практически не изменяются при длительности тока управления (0,8-2) мкс, если не изменяется величина заряда, пропускаемого через РВД при управляющем воздействии. В экспериментах она составляла  $\sim 250$  мкКл. В этом разделе описан малоиндуктивный РВД-коммутатор с рабочим напряжением 16 кВ (рис. 9), состоящий из коаксиального разделительного дросселя и блока из восьми последовательно соединенных РВД с диаметром структур 50 мм.



Рис. 9. РВД-коммутатор.

Приведены результаты его исследований в высоковольтном генераторе, собранном по схеме на рис. 10. Генератор содержал силовые цепи  $C_0$ - $R_0$ - $L_0$  и диодные блоки  $D_0$  препятствующие перезарядке  $C_0$ . Для малоиндуктивного подключения силовых цепей использовались коаксиальные кабели КК. Сердечник дросселя Др был выполнен из тороидальных магнитопроводов с размером 100x25x20 мм из сплава 86КГСП. К моменту коммутации силового тока он перемагничивался до состояния насыщения постоянным током  $\sim 5$  А, пропускаемым через одновитковую обмотку размагничивания  $w_R$  с помощью низковольтного блока размагничивания БР. Для включения блока РВД использовался блок запуска БЗ, содержащий ключ Т на основе ИИТ, резистор  $R=0,5$  Ом и конденсатор С, исходно заряженный до напряжения 5 кВ.

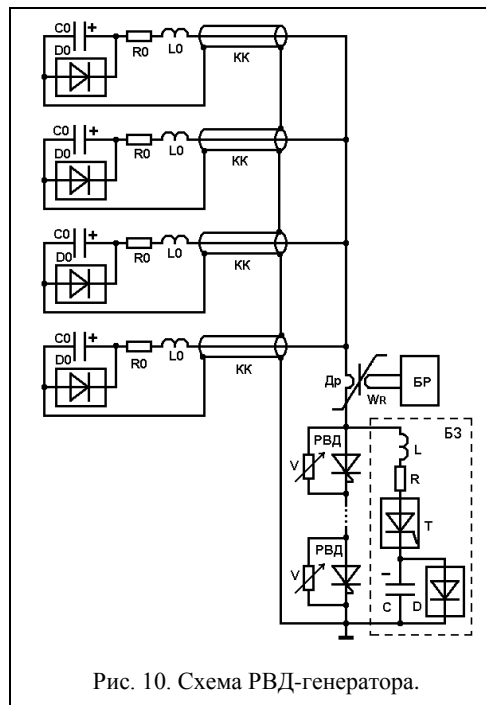


Рис. 10. Схема РВД-генератора.

После включения ключа Т конденсатор С разряжался через последовательно соединенные РВД. В результате формировались токи управления диристоров. Сопротивление резистора R было много больше сопротивления РВД во включенном состоянии, что практически исключало возможность перераспределения силового тока в цепь ключа Т. Результаты экспериментов показали, что при переключении блока РВД импульсом тока управления с амплитудой  $\sim 1$  кА и длительностью  $\sim 600$  нс он способен коммутировать микросекундные импульсы тока с амплитудой  $\sim 180$  кА, нарастающие со скоростью  $\sim 40$  кА/мкс. Достигнутое сочетание большой амплитуды тока через

блок РВД и высокой скорости его нарастания на момент проведения исследований являлось рекордным для полупроводниковых ключей.

Описанный мощный блок запуска БЗ позволил разработать высоковольтный РВД-генератор импульсов тока с амплитудой  $\sim 15$  кА и скоростью нарастания  $\sim 1,3$  кА/мкс, в котором не использовался разделительный дроссель. Основной проблемой при его разработке являлось сильное влияние силовой цепи на процесс переключения блока РВД. В этой связи был проведен расчет параметров блока БЗ, который выполнялся с использованием упрощенной модели РВД, позволяющей определить параметры элементов блока запуска, необходимые для обеспечения эффективного переключения РВД-ключа.

В разделе 3.2 описаны исследования РВД-ключей в ранее неисследованном режиме коммутации мощных импульсов тока с очень коротким (субмикросекундным) фронтом. Отсутствие исследований РВД в этом режиме объясняется исходно обозначенной областью их применения – для коммутации мощных быстро нарастающих микросекундных импульсов тока. Определенный интерес проводимых исследований был обусловлен возможностью нарушения однородности включения РВД вследствие «скин-эффекта».

В этом разделе приведены результаты исследований опытных структур РВД с предельно допустимым напряжением 2,3 кВ и диаметром структур 12 мм. В отличие от промышленно выпускаемых РВД в этих динисторах расстояние между шунтами  $p^+$  анодного эмиттера было уменьшено с 600 мкм до 400 мкм, что обеспечило более равномерное распределение запускающих носителей по рабочей площади. Показано, что опытные РВД на частоте 500 Гц способны коммутировать в нагрузку импульсы силового тока с длительностью  $\sim 3$  мкс, имеющие амплитуду  $\sim 2,5$  кА и фронт  $\sim 800$  нс. Установлено, что при коммутации мощных импульсов тока с фронтом менее 200 нс в исследуемых РВД резко увеличиваются коммутационные потери энергии. Приведены результаты исследований РВД-коммутатора мощных импульсов тока с фронтом  $\sim 300$  нс. Показано, что при силовом напряжении 24 кВ на частоте 100 Гц он способен коммутировать импульсы тока с амплитудой  $\sim 3$  кА и длительностью  $\sim 2,5$  мкс.

В разделе 3.3 описаны исследования РВД, которые были модернизированы с целью повышения коммутационных возможностей в режимах с изменением полярности импульсов силового тока. Предметом исследования являлись разработанные совместно с сотрудниками НИЦ СПП ОАО «Электровыпрямитель» опытные РВД, в которых шунты  $p^+$  анодного эмиттера были вертикально совмещены с шунтами катодного эмиттера и имели такой же диаметр. Такая модернизация позволила создать в динисторных структурах равномерно распределенные хорошо проводящие диодные секции, имеющие сравнительно малые потери энергии при протекании обратного тока. Так как ширина диодных секций была сравнительно мала, то при коммутации прямого тока они заполнялись носителями, инжектированными из эмиттерных слоев. При этом обеспечивалось его достаточно однородное распределение.

Приведенные в этом разделе экспериментальные исследования модернизированных РВД с рабочим напряжением 2 кВ и диаметром структур 50 мм показали, что при коммутации мощных импульсов обратного тока они имеют примерно в 2 раза меньшее падение напряжения по сравнению с базовыми РВД. При коммутации мощных импульсов прямого тока было установлено, что падение напряжения на модернизированных РВД относительно базовых РВД увеличивается незначительно ( $\sim 15\%$ ). В первые моменты после переключения потери энергии в базовых и модернизированных РВД практически одинаковы.

В этом разделе описаны электрические схемы высоковольтных РВД-генераторов знакопеременных слабозатухающих импульсов тока, обеспечивающие сравнительно малые

амплитуды импульсов тока, пропускаемых через динисторы в обратном направлении. Они показаны на рис. 11 и рис. 12.

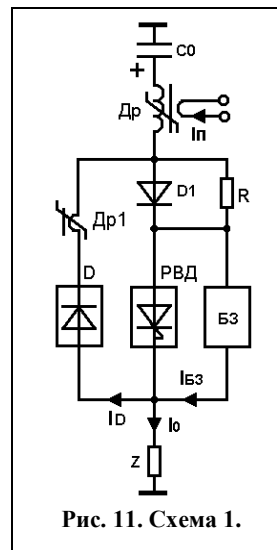


Рис. 11. Схема 1.

медленно спадает с постоянной времени, определяемой величиной индуктивности  $Dp$  в насыщенном состоянии и электрическим сопротивлением блоков РВД и D. Силовой ток обратной полярности протекает через блок диодов D. Так как падение напряжения на диодах невелико, то при этом резкого уменьшения скорости спада тока через блок РВД не происходит, и в момент повторного изменения полярности силового тока через этот блок продолжает протекать ток в прямом направлении. При приложении к блоку D обратного напряжения он выключается и силовой ток прямой полярности коммутируется в блок РВД.

В схеме 1 на рис. 11 цепь D- $Dp1$  шунтирует блок РВД при протекании силового тока с обратной полярностью. Дроссель  $Dp1$  исключает возможность отклонения тока  $I_{B3}$  в блок D. Благодаря использованию диода  $D1$  практически весь обратный ток протекает через блок D. Резистор R создает возможность протекания через РВД небольшого обратного тока, который устраняет возможность их выключения к моменту коммутации повторного импульса прямого тока.

Схема 2 на рис. 12 обеспечивает униполярную форму тока через блок РВД. После достижения максимального значения протекающий через дроссель  $Dp$  силовой ток прямой полярности переключается в цепь блока D и

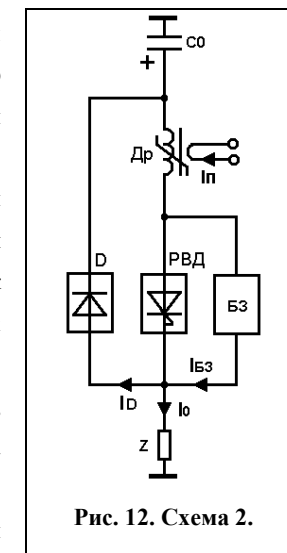


Рис. 12. Схема 2.

В главе 4 описаны мощные импульсные устройства на основе силовых тиристоров и биполярных транзисторов с изолированным затвором.



В разделе 4.1 рассмотрен высоковольтный тиристорный генератор мощных импульсов электромагнитного поля, позволяющий на частоте 10 Гц формировать в индукторе  $L_n=0,8$  мкГн импульсы тока с амплитудой 12 кА и фронтом 1 мкс. Электрическая схема генератора показана на рис. 13.

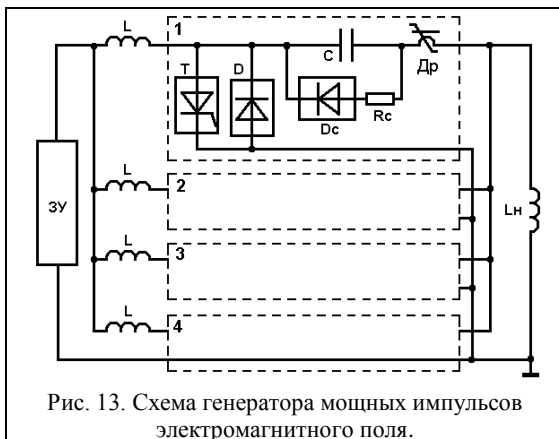


Рис. 13. Схема генератора мощных импульсов электромагнитного поля.

Она состоит из четырех одновременно включаемых модулей 1-4 на основе тиристорных блоков Т с рабочим напряжением 24 кВ, показанных на рис. 4. Демпфирующие цепи  $D_c-R_c$  обеспечивают униполярные импульсы выходного тока.

В разделе 4.2 описан транзисторный генератор прямоугольных импульсов, который позволяет на частоте 1 кГц формировать на барьерном реакторе микросекундные импульсы напряжения с амплитудой 30 кВ и фронтом  $\sim 1,5$  мкс. Электрическая схема генератора приведена на рис. 14. Она состоит из низковольтной цепи на основе повышающего трансформатора  $T_p$  и IGBT-транзистора  $T_1$  и высоковольтной цепи на основе конденсатора  $C_3$  и блока IGBT-транзисторов Т. При включении  $T_1$  конденсатор  $C_3$  и емкость  $C_z$  барьерного реактора Z ( $C_z \ll C_3$ ) быстро заряжается до высокого напряжения. Напряжение на реакторе Z практически не изменяется до момента, когда включается блок Т, который обеспечивает быстрый разряд  $C_3$ .

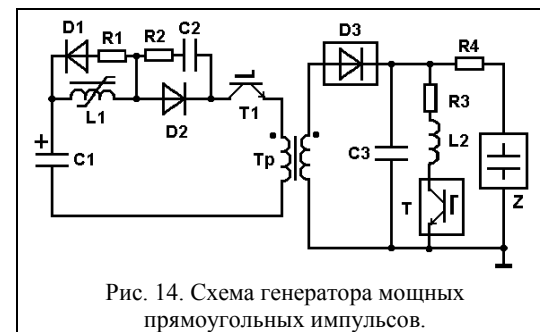


Рис. 14. Схема генератора мощных прямоугольных импульсов.

В разделе 4.3 рассмотрен транзисторный генератор искровых разрядов, способный на частоте 500 Гц при уровне напряжения 30 кВ формировать импульсы разрядного тока с амплитудой  $\sim 500$  А и фронтом  $\sim 150$  нс.

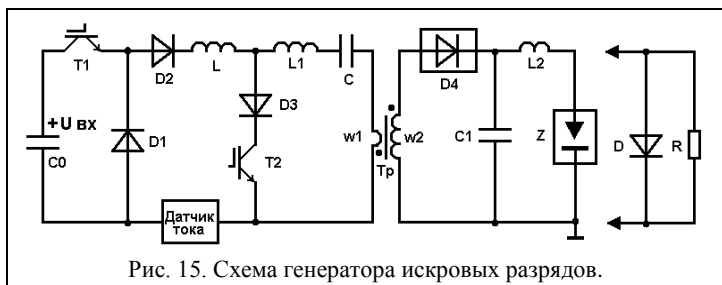


Рис. 15. Схема генератора искровых разрядов.

Электрическая схема генератора показана на рис. 15. После включения транзистора  $T_2$  через первичную обмотку трансформатора  $T_p$

протекает ток разряда конденсатора С и осуществляется зарядка конденсатора  $C_1$  до высокого напряжения. Это напряжение инициирует пробой межэлектродного промежутка в разрядной камере Z. После пробоя через камеру Z протекает ток разряда конденсатора  $C_1$ . Его амплитуда и скорость нарастания определяются сопротивлением канала разряда и величиной монтажной индуктивности  $L_2$ . После окончания тока разряда включается транзистор  $T_1$ , а транзистор  $T_2$  не выключается. В результате через датчик тока по цепи  $C_0-T_1-D_2-L-D_3-T_2$  протекает ток  $I_L$ . Так как  $C_0 \gg C$ , то ток  $I_L$  нарастает практически линейно. В момент, когда  $I_L$  достигает заданного значения, датчик тока генерирует сигнал разрешения, по которому производится выключение транзисторов  $T_1, T_2$ . В результате ток  $I_L$  коммутируется в цепь конденсатора С и производит его зарядку до рабочего напряжения, которое определяется только током  $I_L$  в момент выключения транзисторов. Напряжение зарядки конденсатора С может быть изменено, если датчик тока будет настроен на генерацию сигнала разрешения при другой величине тока  $I_L$ . В штатном режиме разряд в камере Z происходит после зарядки конденсатора  $C_1$  до максимального напряжения, и вся запасенная в нем энергия рассеивается в камере Z. Если разряд возникает раньше окончания процесса зарядки  $C_1$  или межэлектродный промежуток камеры Z закорочен, то конденсатор С перезарядается до обратного

напряжения и в нем остается энергия. Схема на рис. 15 обеспечивает высокоэффективную повторную перезарядку С по цепи  $w_1$ -датчик тока- $D_1-D_2-L-L_1$ . Так как в процессе повторной перезарядки С транзистор  $T_2$  включен, то в момент, когда на конденсаторе С восстанавливается исходная полярность напряжения, ток  $I_L$  начинает протекать через цепь  $D_3-T_2$ . Потери энергии в этой цепи малы, поэтому ток  $I_L$  практически не изменяется до момента включения транзистора  $T_1$ . После включения  $T_1$  диод  $D_1$  выключается, и по цепи  $T_1-D_2-L-D_3-T_2$ -датчик тока протекает ток  $I_L$ . Когда этот ток достигает заданной величины, производится выключение  $T_1, T_2$ . В результате ток  $I_L$  коммутируется в конденсатор С и обеспечивает его зарядку до заданного напряжения. Нестабильность этого напряжения определяется точностью срабатывания датчика тока и составляет  $<5\%$ .

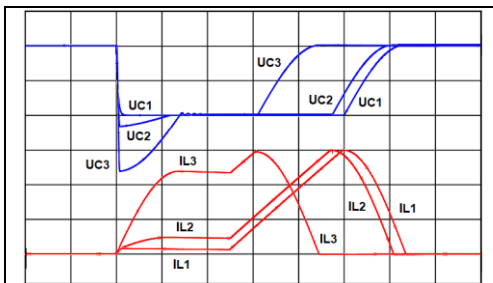


Рис. 16а. Расчетные кривые.  
500В/дел, 10А/дел, 100мкс/дел.

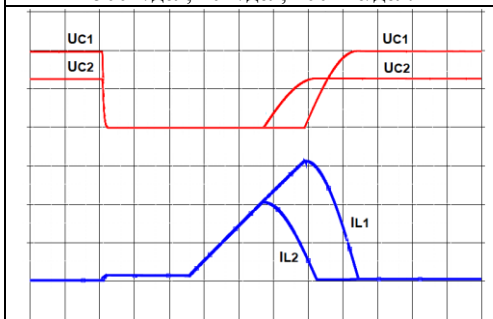


Рис. 16б. Расчетные кривые.  
500В/дел, 10А/дел, 100мкс/дел.

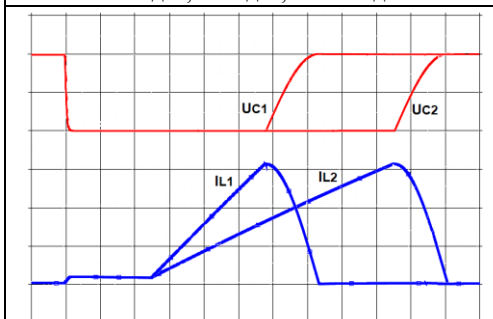


Рис. 16в. Расчетные кривые.  
500В/дел, 10А/дел, 100мкс/дел.

В разделе 4.4 описан мощный тиристорный генератор с выходным током до 200 кА, предназначенный для исследования РВД в условиях промышленного производства. Силовая цепь генератора состоит из 12-ти одновременно включаемых конденсаторных ячеек с коммутаторами в виде силовых тиристоров с рабочим напряжением 1,2 кВ.

Рисунки 16а-16в иллюстрируют результаты компьютерного моделирования переходных процессов в схеме на рис. 15, когда в ней вместо цепи трансформатора Тр использовалась цепь D-R. Они были получены для  $C_0=4000$  мкФ,  $C=3$  мкФ,  $L=2500$  мкГн,  $L_1=1,5$  мкГн и подтверждены экспериментами с точностью до 10%.

На рис. 16а кривые напряжения на конденсаторе С ( $U_{C1}$ ,  $U_{C2}$ ,  $U_{C3}$ ) и тока через индуктивность L ( $I_{L1}$ ,  $I_{L2}$ ,  $I_{L3}$ ) рассчитаны при R, равном 1,5 Ом, 0,7 Ом и 0 Ом. На рис. 16б кривые  $U_{C1}$ ,  $U_{C2}$  и  $I_{L1}$ ,  $I_{L2}$  соответствуют режимам, когда выключение транзисторов производится при разной величине тока через индуктивность L. На рис 16в кривые  $U_{C1}$ ,  $U_{C2}$  и  $I_{L1}$ ,  $I_{L2}$  получены при  $U_{вх}=300$  В и  $U_{вх}=150$  В. По результатам расчета был определен КПД генератора при  $R=0$ , составляющий 96%. Он рассчитывался исходя из величины энергии, исходно запасаемой в конденсаторе С ( $E=1,5$  Дж), величины энергии, возвращаемой в конденсатор С после коммутации силового тока ( $\Delta E^*=0,96$  Дж) и величины входной энергии, потребляемой из конденсатора  $C_0$  ( $\Delta E=0,6$  Дж).

Симметричный подвод выходных токов ячеек к исследуемому РВД осуществляется коаксиальными кабелями.

В главе 5 рассмотрены мощные импульсные устройства на основе РВД.

В разделе 5.1 описаны мощные коммутаторы на основе блока последовательно соединенных РВД и одновиткового разделительного дросселя, собранные по схеме на рис. 17.

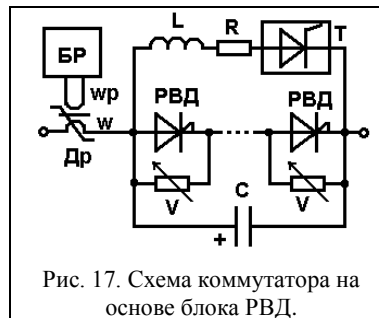


Рис. 17. Схема коммутатора на основе блока РВД.

Процесс включения РВД осуществляется при включении ключа Т, выполненного на основе ИИТ. В результате по цепи L-R протекает ток перезарядки конденсатора С, исходно заряженного до силового напряжения. В момент изменения полярности напряжения на конденсаторе С к РВД прикладывается обратное напряжение. При этом ток индуктивности L коммутируется в РВД и является током управления.

Резистор R (~0,5 Ом), исключает возможность перераспределения силового тока в блок Т. Блок размагничивания БР содержит низковольтный источник напряжения и выходную индуктивность, которая обеспечивает его защиту от воздействия импульса высокого напряжения, возникающего на обмотке размагничивания  $w_p$  в процессе коммутации силового тока.

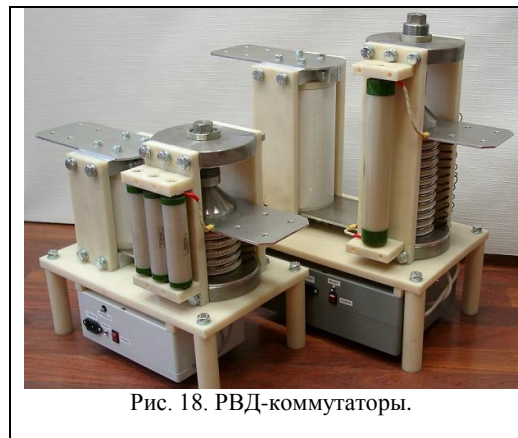


Рис. 18. РВД-коммутаторы.

На рис. 18 показана фотография разработанных РВД-коммутаторов с рабочим напряжением 12 и 24 кВ, позволяющих коммутировать импульсы тока с амплитудой до 300 кА, длительностью несколько сотен мкс и фронтом ~100 мкс. Унифицированная конструкция коммутаторов обеспечивает возможность использования РВД разных размеров, обеспечивает высокую изоляционную прочность и большое

(~100 кг/см<sup>2</sup>) равномерно распределенное прижимное усилие, требуемое для создания

малого контактного сопротивления между РВД. В коммутаторах справа расположены блоки РВД, слева – одновитковые разделительные дроссели Др. Запускающие конденсаторы С находятся перед блоками РВД. В пластмассовых корпусах под монтажными панелями размещены тиристорные цепи запуска и блоки размагничивания. Сборки варисторов V закреплены справа от блоков РВД (на фото они не видны).

В разделе 5.2 приведены результаты использования разработанных РВД-коммутаторов в генераторе мощных импульсных магнитных полей с пиковыми значениями до 50 Тл, разработанном в ФТИ Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (г. Саров) и в генераторе мощных дуговых разрядов с энергией ~1 МДж, разработанном в АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова» (г. Санкт Петербург).

В разделе 5.3 описан разработанный совместно с сотрудниками Санкт-Петербургского Политехнического Университета Петра Великого (ФГАОУ ВО СПбПУ) генератор мощных ударных волн в воде с энергоемкостью 100 кДж. Приведены результаты его исследования, обеспечившие гидроударное разрушение бетонных блоков с объемом до 1 м<sup>3</sup>.

В разделе 5.4 приведены результаты использования разработанных импульсных устройств (высоковольтных коммутаторов на основе РВД, дросселей насыщения Др, блоков запуска РВД и блоков размагничивания сердечников Др) в генераторах с энергоемкостью ~0,8 МДж, разработанных совместно с сотрудниками ИЛФИ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» (г. Саров), ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО», НИЦ СПП ПАО «Электровыпрямитель» (г. Саранск) и Федерального исследовательского центра «Институт прикладной физики РАН» (г. Нижний Новгород) для создания мощных импульсов тока предионизации ксенонных ламп в системах питания мощных неодимовых лазеров и последующей накачки этих ламп импульсами тока с амплитудой ~250 кА и длительностью ~400 мкс. Фотографии разработанных устройств показаны на рис. 19, рис. 20 и рис. 21.



Рис. 19. Блок запуска РВД.



Рис. 20. Дроссель и блок размагничивания.



Рис. 21. РВД-коммутатор цепи предионизации ламп накачки.

**В Заключение** изложены результаты работы:

1. Разработаны высоковольтные ключи на основе малогабаритных последовательно соединенных IGBT-транзисторов IRGPS60B120KD, которые благодаря использованию разработанных цепей управления способны коммутировать субмикросекундные импульсы тока с амплитудой до 500 А, которая почти на порядок больше, чем величина их рабочего тока (60 А).
2. Разработаны малогабаритные ключи с рабочим напряжением 24 кВ, выполненные на основе последовательно соединенных тиристоров ТБ133-250-24 с рабочим током 250 А и рабочим напряжением 2,4 кВ, способные коммутировать микросекундные импульсы тока с амплитудой 4 кА и фронтом 0,7 мкс.
3. Установлено, что разработанные при участии автора импульсные интегральные тиристоры (ИИТ) с рабочим напряжением 2,5 кВ и площадью структур 1 см<sup>2</sup> в моноимпульсном режиме способны коммутировать микросекундные импульсы тока с амплитудой ~3 кА и фронтом ~400 нс, а в пакетно-импульсном режиме могут работать на частоте 50 кГц, при амплитуде и длительности импульсов коммутируемого тока соответственно 500 А и 1 мкс.
4. Разработаны малогабаритные ИИТ-ключи с рабочим напряжением 25 кВ, которые на частоте 100 Гц позволяют коммутировать микросекундные импульсы тока с амплитудой 2,7 кА и фронтом 800 нс.
5. Показана возможность эффективного переключения РВД импульсами тока с длительностью, уменьшенной с традиционного микросекундного диапазона до субмикросекундного, что позволяет существенно сократить размеры и индуктивность

дросселя, используемого в РВД-устройствах для разделения силовой цепи и цепи управления.

6. Разработан коммутатор, состоящий из дросселя насыщения и блока последовательно соединенных РВД с диаметром структур 50 мм, который при силовом напряжении 16 кВ способен коммутировать импульсы тока с уникальными для полупроводниковых ключей параметрами (амплитуда 180 кА, длительность 30 мкс, максимальная скорость нарастания 40 кА/мкс).

7. Показана возможность эффективного использования РВД-ключей для коммутации мегаваттных субмикросекундных импульсов, позволяющая расширить диапазон использования РВД с традиционного микросекундного уровня до уровня сотен наносекунд.

8. Установлено, что при протекании импульсов обратного тока падение напряжения на модернизированных РВД с увеличенной площадью каналов обратной проводимости в 2,2 раза меньше, чем на базовых РВД, а при протекании мощных импульсов прямого тока оно увеличивается менее чем на 15 %

9. Разработаны схемы коммутаторов слабозатухающих знакопеременных импульсов тока на основе блоков РВД, в которых амплитуда протекающих через РВД импульсов обратного тока пренебрежимо мала, что позволяет радикально увеличить их коммутационные возможности.

10. Разработан малогабаритный тиристорный генератор, позволяющий на частоте 10 Гц формировать в индукторе с индуктивностью 0,8 мкГн импульсы тока с амплитудой 12 кА и фронтом 1 мкс, которые обеспечивают высокую амплитуду электромагнитного поля.

11. Разработан малогабаритный транзисторный генератор прямоугольных импульсов, который позволяет на частоте 1 кГц формировать на барьерном реакторе микросекундные импульсы напряжения с амплитудой 30 кВ и фронтом ~1,5 мкс.

12. Разработан принцип построения генераторов мощных электрических разрядов, который позволяет эффективно использовать энергию, отраженную от разрядной камеры при изменении моментов ее пробоя и при изменении сопротивления канала разряда. Показаны результаты исследования опытного образца такого генератора, способного на частоте 500 Гц при уровне напряжения 30 кВ формировать импульсы разрядного тока в воде с амплитудой ~500 А и фронтом 150 нс.

13. Разработан мощный тиристорный генератор, который обеспечивает возможность исследования РВД при коммутации импульсов тока с амплитудой до 200 кА в условиях промышленного производства.

14. Разработаны унифицированные высоковольтные РВД-ключи, которые были использованы в различных мощных электрофизических установках, в частности, в генераторе импульсных магнитных полей с пиковыми значениями до 50 Тл и в установке для получения дуговых разрядов с энергией ~1 МДж.

15. Разработано РВД-устройство с энергоемкостью 100 кДж, обеспечивающее гидроударное разрушение бетонных блоков с объемом до 1 м<sup>3</sup>.

16. Разработаны мощные РВД-ключи с рабочим напряжением 24 кВ и рабочим током 250 кА, которые были использованы в генераторах энергоемкостью 1,1 МДж, обеспечивающих накачку сверхмощных неодимовых лазеров.

Показаны перспективы многократного увеличения выходной мощности разработанных импульсных устройств. Так, принципы построения высоковольтных блоков тиристоров, транзисторов и реверсивно включаемых динисторов позволяют в несколько раз увеличивать их рабочее напряжение путем увеличения количества последовательно соединенных полупроводниковых приборов. Значительное увеличение амплитуды выходного тока в разработанных устройствах может быть достигнуто при параллельном соединении полупроводниковых блоков, а также при увеличении их рабочей площади. Средняя мощность импульсных устройств может быть повышена в результате увеличения частоты следования выходных импульсов.

**Основные результаты** диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Аристов Ю. В., Воронков В. Б., Грехов И. В., Жмодиков А. Л., Козлов А. К., Коротков С. В., Рольник И. А. Р.в.д. переключатель микросекундных импульсов гигаваттного диапазона мощности // Приборы и техника эксперимента. – 2007. – № 2. – С. 91-95.
2. Фридман Б. Э., Коротков С. В., Мартыненко В. А., Еникеев Р. Ш., Коврижных Н. А., Аристов Ю. В., Беляков В. А., Бондарчук Э. Н., Дроздов А. А., Жмодиков А.Л., Козлов А. К., Муратов В. П., Прокопенко В. Ф., Рошаль А. Г., Фролов О. В., Хапугин А. А., Чегодаев А. Т., Чумаков Г.Д. Конденсаторная ячейка емкостного накопителя энергии с коммутатором на основе реверсивно включаемых динисторов // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – № 6. – С. 51-57.

3. Коротков С. В., Аристов Ю. В., Воронков В. Б., Жмодиков А. Л., Козлов А. К., Коротков Д. А., Люблинский А. Г. РВД-коммутатор мощных импульсов тока // Приборы и техника эксперимента. – 2010. – № 1. – С. 172-173.
4. Коротков С. В., Жмодиков А. Л. Перспективы использования реверсивно включаемых динисторов в режимах коммутации субмикросекундных импульсов тока // Приборы и техника эксперимента. – 2011. – №1. – С. 68-71.
5. Korotkov S. V., Lyublinsky A. G., Aristov Y. V., Zhmodikov A. L., and Kozlov A. K. Microsecond Range RSD-based Generators for Pulse Power Technologies // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2013. – Vol. 41. – No. 10. – Part 1. – P. 2879-2884.
6. Коротков С. В., Аристов Ю. В., Жмодиков А. Л., Козлов А. К., Коротков Д. А. Мощные коммутаторы на основе реверсивно включаемых динисторов для высоковольтных импульсных технологий // Приборы и техника эксперимента. – 2014. – № 3. – С. 58-62.
7. Коротков С. В., Аристов Ю. В., Жмодиков А. Л., Козлов А. К., Коротков Д. А. Высоковольтные диодно-динисторные коммутаторы мощных знакопеременных импульсов тока // Приборы и техника эксперимента. – 2014. – №4. – С. 61-66.
8. Грехов И. В., Жмодиков А. Л., Коротков С. В. Высоковольтный импульсный интегральный тиристор // Приборы и техника эксперимента. – 2015. – № 1. – С. 67-69.
9. Грехов И. В., Жмодиков А. Л., Коротков С. В., Прижимнов С. Г., Фоменко Ю. Л. Исследование высоковольтных интегральных импульсных тиристоров в моноимпульсном и пакетно-импульсном режимах // Приборы и техника эксперимента. – 2016. – № 3. – С. 32-36.
10. Коротков С. В., Жмодиков А. Л., Козлов А. К., Коротков Д. А., Матлашов П. Е. Малогабаритные коммутаторы мощных микросекундных импульсов на основе в.и.т. и р.в.д. // Приборы и техника эксперимента. – 2017. – №1. – С. 56-59.
11. Коротков С. В., Аристов Ю. В., Жмодиков А. Л., Козлов А. К., Коротков Д. А. Коммутаторы мощных импульсов тока с субмикросекундным фронтом нарастания на основе последовательно соединенных IGBT-транзисторов // Приборы и техника эксперимента. – 2018. – № 1. – С. 42-47.
12. Коротков С. В., Хапугин А. А., Мартыненко В. А., Елисеев В. В., Жмодиков А. Л., Козлов А. К. Исследование реверсивно включаемых динисторов, модернизированных с целью уменьшения потерь энергии при коммутации импульсов обратного тока // Приборы и техника эксперимента. – 2018. – № 3. – С. 45-50.
13. Коротков С. В., Жмодиков А. Л., Коротков Д. А. Тиристорный генератор микросекундных прямоугольных импульсов высокого напряжения // Приборы и техника эксперимента. – 2021. – № 3. – С. 45-49.
14. Коротков С. В., Коротков Д. А., Аристов Ю. В., Жмодиков А. Л. Высокоэффективный генератор мощных высоковольтных импульсов с микросекундной длительностью // Приборы и техника эксперимента. – 2021. – № 3. – С. 50-54.
15. Коротков С. В., Жмодиков А. Л., Коротков Д. А. Высоковольтный тиристорный генератор мощных импульсов тока с субмикросекундным фронтом // Приборы и техника эксперимента. – 2021. – № 3. – С. 55-59.
16. Korotkov S. V., Zhmodikov A. L. Compact generators of high-power fast-rising pulses with closing switches in the form of reversely switched dynistors // Review of Scientific Instruments. – 2021. – Vol. 92. – No. 10. – P. 104703-1-5.
17. Коротков С. В., Аристов Ю. В., Жмодиков А. Л. Мощные импульсные устройства для исследования реверсивно включаемых динисторов // Приборы и техника эксперимента. – 2022. – № 3. – С. 40-44.