

*На правах рукописи*



**Серебров Роман Александрович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ  
КОММУТАТОРОВ ДЛЯ ЕМКОСТНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ**

01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в Акционерном обществе «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова»

Научный руководитель: доктор технических наук,  
старший научный сотрудник,  
Фридман Борис Эммануилович,  
начальник лаборатории  
Акционерное общество «НИИЭФА  
им. Д.В. Ефремова» (АО «НИИЭФА»).

Официальные оппоненты: Бочаров Юрий Николаевич,  
доктор технических наук, доцент,  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Санкт-Петербургский  
политехнический университет Петра Великого»  
профессор кафедры «Техника высоких  
напряжений, электроизоляционная и кабельная  
техника».

Коротков Дмитрий Александрович,  
кандидат технических наук,  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Физико-технический институт  
имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
научный сотрудник.

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное  
предприятие Российский федеральный ядерный  
центр Всероссийский научно-исследовательский  
институт экспериментальной физики  
(ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»).

Защита состоится 27 февраля 2018г. в \_\_ часов в \_\_\_ ауд. Главного корпуса «СПбПУ» на заседании диссертационного совета Д 212.229.16 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «СПбПУ» [www.spbstu.ru](http://www.spbstu.ru)

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2018г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.229.16  
к.т.н., доцент



Журавлева Наталия Михайловна

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность работы**

Емкостные накопители энергии находят широкое применение в различных областях экспериментальной физики и техники. Они способны генерировать импульсы тока амплитудой до десятка мегампер длительностью от долей микросекунды до нескольких миллисекунд, не требуют большой мощности на стадии накопления энергии (заряда), способны длительное время находиться в заряженном состоянии. Генерация импульса тока в емкостном накопителе энергии может быть относительно просто синхронизирована с работой других электрофизических установок.

До недавнего времени в емкостных накопителях энергии использовались газоразрядные коммутаторы, которые не в полной мере обеспечивали выполнение требований эксплуатации и надежности электрофизических установок. С появлением мощных полупроводниковых приборов, способных коммутировать импульсные токи амплитудой в десятки и сотни килоампер, стало возможным создание импульсных установок, свободных от недостатков емкостных накопителей энергии с газоразрядными коммутаторами и обладающих высокими эксплуатационными качествами. В настоящее время работам по созданию импульсных установок с полупроводниковыми коммутаторами, в том числе емкостных накопителей энергии, уделяется большое внимание; такие разработки ведутся в ряде стран, занимающих ведущие позиции в области мощной импульсной техники (Россия, США, Франция, Германия, Корея и другие).

Особенностью мощных полупроводниковых приборов является то, что в отличие от газоразрядных коммутаторов они, как правило, разрушаются при отклонениях от допустимых условий эксплуатации, в том числе при кратковременном превышении амплитуды разрядного тока, при коммутационных перенапряжениях, при перегреве коммутируемым током полупроводниковой структуры.

Каждое новое применение полупроводниковых коммутаторов в импульсных установках требует выполнения комплекса новых исследований и разработок. Это объясняется новизной и небольшим опытом работы с полупроводниковыми ключами, особенностями использования разных типов полупроводниковых приборов в разрядных контурах различных импульсных установок, отсутствием отработанных стандартных решений в этой области. Свидетельством этому является постоянная готовность ведущих периодических изданий и конференций в области мощной импульсной техники публиковать материалы подобных исследований и разработок.

В связи с этим разработка полупроводниковых коммутаторов больших импульсных токов и исследование условий их работы является актуальной задачей.

### **Цель работы**

Основной целью работы является создание емкостных накопителей энергии с полупроводниковыми коммутаторами для генерации импульсов тока длительностью в десятки и сотни микросекунд.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

- Разработать методы экспериментального исследования и стенды для испытаний элементов полупроводниковых коммутаторов больших импульсных токов.

- Исследовать переходные процессы в разрядных контурах емкостных накопителей энергии разных типов для выявления особенностей работы полупроводниковых коммутаторов в этих накопителях.

- Экспериментально исследовать особенности работы силовых полупроводниковых приборов (диодов, реверсивно включаемых диодисторов (РВД), тиристоров и фототиристоров) при коммутации импульсных токов во временном диапазоне 0,5 – 1 мс и амплитудой тока до 120 кА и определить условия их надежной эксплуатации.

- Разработать методы и устройства защиты и диагностики полупроводниковых приборов в коммутаторах больших импульсных токов емкостных накопителей энергии.

- Создать высоковольтные блоки коммутаторов тока и исследовать их работу в емкостных накопителях энергии.

- Создать емкостные накопители энергии для различных применений, в том числе для систем защитного вывода энергии Международного Термоядерного Экспериментального Реактора (ИТЭР) и в жестких условиях эксплуатации.

### **Научная новизна работы**

В силу мирового малого опыта применения в импульсной технике мощных полупроводниковых коммутаторов и отсутствия отработанных технических решений для установок больших импульсных токов каждая новая мощная импульсная установка с полупроводниковыми коммутаторами, доведенная до практического применения, может рассматриваться как новое научно-обоснованное техническое решение, имеющее существенное значение для развития мощной импульсной техники.

1. Впервые выполнены исследования и разработка коммутаторов на основе новых отечественных силовых полупроводниковых приборов – фототиристоров при импульсных токах до 120 кА длительностью 550 – 750 мкс; определены предельные токовые нагрузки и рабочие режимы фототиристоров. Эти исследования позволили обосновать применение фототиристоров в мощных импульсных установках двух типов: в батарее противотока и в емкостном накопителе энергии с формирующей цепью, состоящей из кроубарного диода и индуктора. Созданные коммутаторы обеспечивают большой срок службы, характеризуются относительной простотой обслуживания, экологической чистотой и возможностью работы в частотном режиме.

2. Описаны и систематизированы методы испытаний и отбора элементов полупроводниковых коммутаторов, обеспечивающие работоспособность разрядных контуров емкостных накопителей энергии. Были выявлены и обоснованы признаки нестабильной работы РВД и фототиристоров, которые могут быть положены в основу предварительной отбраковки элементов полупроводниковых коммутаторов.

3. Исследовано влияние интенсивности протонного облучения при изготовлении мощных импульсных диодов на вольтамперные характеристики и процессы обратного восстановления диодов. Показано существование оптимального уровня протонного облучения, обеспечивающего наилучшие эксплуатационные характеристики диодов.

4. Исследованы особенности переходного процесса в батарее противотока при гашении дуги в

коммутационном аппарате, которые определяют режим работы полупроводниковых коммутаторов в этих батареях.

5. Найдены соотношения и исследованы особенности переключения тока в цепь кроубарных диодов в разрядном контуре с формирующей цепью; определены условия безопасной работы полупроводникового коммутатора в таком контуре.

6. Систематизированы и исследованы экспериментально различные варианты построения разрядных контуров компактных емкостных накопителей энергии с формирующей цепью, что позволило выбрать оптимальный вариант разрядного контура с малыми потерями энергии в разрядном процессе, обладающего высокой работоспособностью.

7. Исследовано влияние обрыва тока в конденсаторной батарее с формирующей цепью на разных стадиях разрядного процесса, на работу полупроводникового коммутатора. Показано, что индуктор и снабберные цепи кроубарных диодов обеспечивают гашение перенапряжений, возникающих при обрыве тока в индукторе.

8. Новым является исследование проникновения импульсного магнитного поля в тонкой полосе малоуглеродистой стали на фронте мощного импульса тока и применение результатов этого исследования для выявления особенностей работы разрядных резисторов системы защитного вывода энергии ИТЭР.

### **Практическая значимость работы**

Все разработки, представленные в работе, реализованы в конструкциях действующих импульсных установок и доведены до практической реализации.

1. Создан мощный коммутатор на основе РВД (18 кВ, 50 кА), который вошел в состав конденсаторной ячейки, используемой в компактном емкостном накопителе энергии 1 МДж. Накопитель энергии успешно выдержал приемо-сдаточные испытания и введен в эксплуатацию в лаборатории Нанкинского Университета Науки и Технологии (Китай).

2. Созданные два типа полупроводниковых коммутаторов на основе фототиристоров на рабочее напряжение 12 кВ и током до 100 кА вошли в состав конденсаторных батарей противотока (неревверсивной TF CPC и реверсивной PF/CS CPC) коммутационной аппаратуры проекта ИТЭР. Конденсаторные батареи выдержали испытания (с участием представителей ИТЭР) и допущены к серийному производству и поставке для ИТЭР.

3. Разработан блок коммутаторов, состоящий из фототиристоров и кроубарных диодов, с рабочим напряжением 6 кВ и максимальным током 120 кА, который включен в состав малогабаритного емкостного накопителя энергии, предназначенного для эксплуатации в жестких условиях.

4. Результаты исследования проникновения импульсного магнитного поля в полосе малоуглеродистой стали на фронте импульса тока доказали, что наблюдаемое при защитном выводе энергии в ИТЭР кратковременное увеличение падения напряжения на разрядных резисторах не требует применения дополнительных демпфирующих устройств, что позволило упростить коммутационную аппаратуру ИТЭР.

Разработки полупроводниковых коммутаторов, описанные в диссертации, были представлены сотрудниками АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова»: Р.Ш. Еникеевым и автором в докладе

«Высоковольтные коммутаторы больших импульсных токов», который победил в конкурсе фонда академика Ж.И. Алферова на лучшую исследовательскую работу в области естественных наук для молодых ученых в номинации «ЭНЕРГЕТИКА И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ». Автор диссертации и Р.Ш. Еникеев стали лауреатами этого конкурса и награждены золотыми медалями.

### **Методология и методы диссертационного исследования**

Исследования базируются на разработанных автором методах экспериментальных исследований мощных полупроводниковых коммутаторов, на аналитических и экспериментальных методах изучения электрических переходных процессов в установках больших импульсных токов и процессов проникновения в проводящие материалы импульсных магнитных полей.

### **На защиту выносятся следующие результаты**

1. Методы и устройство оборудования для испытаний и отбора элементов разрядных контуров емкостных накопителей энергии с полупроводниковыми коммутаторами.

2. Создание двух конденсаторных батарей противотока для коммутационных аппаратов систем защитного вывода энергии ИТЭР. Доказательство возможности коммутации в электрической цепи тока до 100 кА с помощью фототиристоров при воздействии на коммутатор волны обратного напряжения.

3. Конструкция коммутатора на основе фототиристоров и диодов для емкостного накопителя энергии 120 кДж с высокой плотностью энергии (до 0,4 Дж/см<sup>3</sup>), предназначенного для работы в жестких условиях эксплуатации.

4. Результаты исследования проникновения импульсного магнитного поля в полосу малоуглеродистой стали разрядного резистора, которые показали кратковременное увеличение напряжения на фронте импульса тока. При этом в условиях работы разрядных резисторов ИТЭР к моменту максимума тока сталь переходит в насыщенное магнитное состояние и магнитные свойства стали не влияют на амплитуду напряжения на резисторе.

### **Реализация результатов работы**

Результаты диссертационной работы использованы в АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова» при выполнении зарубежных контрактов с Нанкинским университетом науки и технологии (Китай) и с организацией ИТЭР (Франция). (Акты использования прилагаются).

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается применением современной аппаратуры, большим объемом полученных экспериментальных данных, а также использованием результатов исследований в действующих импульсных установках, которые выдержали многочисленные испытания и сданы в эксплуатацию.

### **Личный вклад автора в представленную работу**

1. Автор разработал методы испытаний элементов полупроводниковых коммутаторов и конденсаторных ячеек, а также создал необходимые для этого стенды и испытательные установки. Выполненные испытания и подбор по характеристикам элементов коммутаторов и ячеек обеспечили работоспособность конденсаторных ячеек емкостного накопителя энергии 1 МДж с коммутаторами на основе РВД и импульсных диодов.

2. Автор внес основной вклад в создание семейства конденсаторных батарей противотока 10 кВ, 100 кА для систем защитного вывода энергии, которые прошли испытания и допущены к серийному производству для проекта ИТЭР.

3. Автор внес решающий вклад в создание компактного емкостного накопителя энергии с коммутатором на основе фототиристоров и импульсных диодов, предназначенный для работы в жестких условиях эксплуатации.

4. Автор выполнил комплекс экспериментальных исследований проникновения импульсного магнитного поля в стальную полосу разрядного резистора системы защитного вывода энергии ИТЭР.

#### **Апробация результатов работы**

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. 17<sup>th</sup> IEEE International Pulsed Power Conference, June 28-July 2, 2009, Washington DC, USA (3 доклада).

2. International Conference for Power Conversion Intelligent Motion (PCIM Europe 2011), 17-19 May 2011, Nuremberg, Germany (1 доклад).

3. 18<sup>th</sup> IEEE International Pulsed Power Conference, June 19-23, 2011, Chicago, USA (3 доклада).

4. 4<sup>th</sup> Euro-Asian Pulsed Power Conference and 19<sup>th</sup> International Conference on High-Power Particle Beams, October 30 - September 4, 2012, Karlsruhe, Germany (1 доклад).

5. Конференция «Силовая электроника», 17 ноября 2012 года, Москва, Россия (1 доклад).

6. 20<sup>th</sup> IEEE International Pulsed Power Conference, June 19-22, 2017, Brighton, UK, (1 доклад). **Публикации**

Основные материалы диссертации опубликованы в 16 работах из них 3 статьи в Российских журналах, рекомендованных перечнем ВАК Минобрнауки РФ, 10 статей в журналах, включенных в международную библиографическую базу Web of Science, 9 докладов на международных конференциях. Список публикаций приведен в конце автореферата.

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

Диссертационная работа изложена на 157 страницах печатного текста, состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 38 таблиц, 142 рисунка. Список используемой научной литературы содержит 64 наименования.

#### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности**

Содержание диссертации соответствует пункту 2 паспорта специальности 01.04.13 Электрофизика, электрофизические установки: «Исследование физических процессов в накопителях энергии индуктивного, емкостного, инерционного, высокочастотного, взрывоманитного и других типов, разработка конструкций накопителей».

#### **Основное содержание работы**

**Во введении** излагается актуальность диссертационной работы, формируется цель работы, определяются задачи, которые решаются в диссертационной работе. Рассматриваются вопросы научной новизны, практической значимости диссертационной работы. Излагается личный вклад автора в представленную работу, результаты, выносимые на защиту, а также приведено краткое

содержание диссертационной работы.

**В первой главе** приведен краткий обзор емкостных накопителей и определены современные тенденции развития источников больших импульсных токов. Новые задачи физического эксперимента потребовали увеличения запасаемой энергии (до десятков мегаджоулей) и амплитуды разрядного тока (до единиц и десятков мегаампер) в емкостных накопителях энергии.

Современным тенденциям создания больших емкостных накопителей энергии соответствует проект емкостного накопителя энергии с запасаемой энергией 1 МДж, напряжением 18 кВ, который был разработан и испытан с участием автора диссертационной работы.

Таблица 1. Основные параметры конденсаторной ячейки.

Запасаемая энергия	64 кДж
Емкость	400 мкФ
Максимальное зарядное напряжение	18 кВ
Индуктивность сменных индукторов	От 25 до 80 мкГн
Максимальный ток	60 кА
Габариты (длина×ширина×высота)	400×330×800 мм

Основной структурной единицей емкостного накопителя энергии является конденсаторная ячейка, принципиальная электрическая схема которой представлена на рис. 1 и основные параметры приведены в таблице 1.

Создание конденсаторных ячеек потребовало выполнения большого объема работ по испытанию и отбору элементов конденсаторной ячейки, по разработке и изготовлению экспериментальных

стендов для выполнения испытаний, по доработке и улучшению первоначальной конструкции некоторых элементов и сборок.

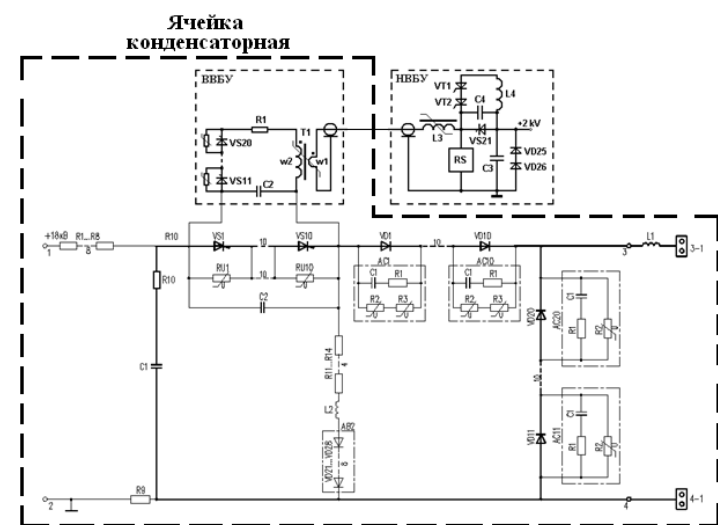


Рис. 1. Электрическая схема конденсаторной ячейки. ВВБУ – высоковольтный блок управления, НВБУ – низковольтный блок управления

и изготовлен высоковольтный стенд, состоящий из источника постоянного высокого напряжения (3,5 кВ), приборов для измерения тока и напряжения, а также устройств защиты и блокировки.

На этом стенде было испытано порядка 400 РВД двух типов, 600 диодов трех типов и порядка 3000 варисторов 6-и типов. По результатам испытаний производился отбор и согласование вольтамперных характеристик полупроводниковых приборов. При измерении вольт-амперных характеристик РВД (VS11 – VS20 на рис. 1) у некоторых приборов наблюдался увеличенный ток утечки, шумы и неустойчивость закрытого состояния прибора.

В конденсаторной ячейке используется 9 видов полупроводниковых приборов (2 вида РВД, 3 вида высоковольтных импульсных диодов, 4 вида нелинейных ограничителей напряжения – варисторов). Полупроводниковые ключи (РВД и диоды) испытывались в закрытом и в открытом (проводящем) состоянии, для ограничителей напряжения проверялась и подбиралась вольт-амперная характеристика.

Для измерения вольт-амперных характеристик ключей в закрытом состоянии и ограничителей напряжения был разработан

и изготовлен высоковольтный стенд, состоящий из источника постоянного высокого напряжения (3,5 кВ), приборов для измерения тока и напряжения, а также устройств защиты и блокировки.



Это явление было объяснено пробоями внутри корпуса РВД. Подобные полупроводниковые приборы отбраковывались и не использовались в конденсаторных ячейках.

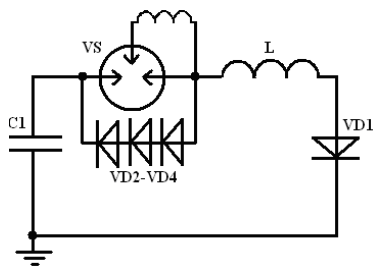


Рис. 2. Схема разрядного контура стенда для динамических испытаний диодов.  $C_1 = 200$  мкФ,  $L = 38$  мкГн,  $VS$  – разрядник вакуумный,  $VD_1$  – испытываемый диод

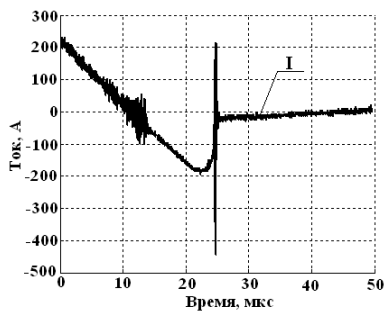
Испытания диодов при больших импульсных токах производились на стенде (рис. 2). При испытаниях контролировался процесс обратного восстановления диодов. Был обнаружен резкий обрыв тока и неустойчивость процесса обратного восстановления (рис. 3а). Такие диоды с «жестким» обратным восстановлением выходили из строя при испытаниях конденсаторных ячеек. Это стало основанием для введения в технологический процесс на заводе-изготовителе операции протонного облучения диодов.

Была выполнена оценка влияния дозы протонного облучения на характеристики обратного восстановления отсекающих ( $VD_{11} - VD_{20}$ ) и кроубарных ( $VD_1 - VD_{10}$ ) диодов. Опытные партии диодов были подвергнуты протонному облучению, параметры которых представлены в таблице 2. Характерная осциллограмма обратного восстановления диода, подвергнутого протонному облучению, приведена на рис. 3б. Параметры обратного восстановления (импульсный обратный ток, заряд обратного восстановления, время обратного восстановления) приведены в таблице 2.

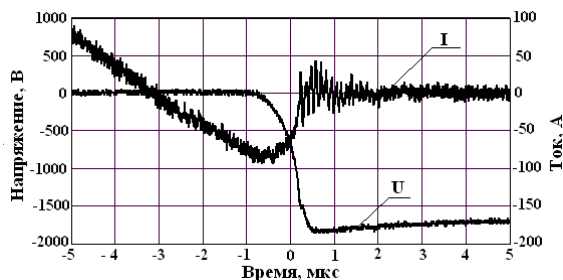
Таблица 2. Характеристики протонного облучения диодов и обратного восстановления диодов.

Диод	Степень облучения			Импульсный обратный ток $I_{RM}$ А	Заряд обратного восстановления $Q_{rr}$ мкКл	Время обратного восстановления $t_{rr}$ мкс
	Название	Доза	Энергия			
		см <sup>2</sup>	МэВ			
ДИ153-1600-30	без облучения	-	-	180	1000	12
	«слабое»	$1 \cdot 10^{11}$	2.46	83,2	179,5	3,8
	«среднее»	$2 \cdot 10^{11}$	2.78 и 3.93	78,5	158	3,55
	«сильное»	$5 \cdot 10^{12}$	2.52	62	104,8	3,1
ДИ173-4000-22	без облучения	-	-	350	3000	20
	«слабое»	$1 \cdot 10^{11}$	2.46	102	264,1	4,1
	«среднее»	$2 \cdot 10^{11}$	2.78 и 3.93	86,9	171,3	3,5
	«сильное»	$5 \cdot 10^{12}$	2.52	70,5	115	3,16

Облученные протонами диоды показали «мягкое», устойчивое обратное восстановление. По результатам исследования были выбраны «средняя» степень облучения протонами для отсекающих диодов и «сильная» степень облучения протонами для кроубарных диодов. Впоследствии облученные протонами диоды надежно работали в составе конденсаторных ячеек. Выдержавшие испытания и отобранные полупроводниковые приборы собирались в высоковольтные сборки. Ограничители напряжения изолировались посредством заливки полимерной изоляцией. Подготовленные таким образом компоненты соединялись между собой и устанавливались между стяжными плитами, обеспечивающими контактное давление в сборках полупроводниковых ключей.



а) без протонного облучения



б) после протонного облучения

Рис. 3. Ток  $I$  и напряжение  $U$  на диодах при их обратном восстановлении

Все работы по испытанию и отбору элементов конденсаторных ячеек были успешно выполнены, что явилось основанием для завершения всего комплекса работ по созданию емкостного

накопителя энергии с рекордной плотностью энергии  $0,4 \text{ Дж/см}^3$ . Емкостной накопитель энергии 1 МДж испытывался в лабораторных условиях и у Заказчика при коротком замыкании в нагрузке и в режиме холостого хода. Все испытания подтвердили заданные параметры и работоспособность установки.

Во второй главе описываются разработанные с участием автора конденсаторные ячейки для системы быстрого защитного вывода энергии (Fast Discharge) из сверхпроводящих катушек ИТЭР. Эта система работает при напряжении до 12 кВ и токе в сверхпроводящих магнитных системах до 70 кА.

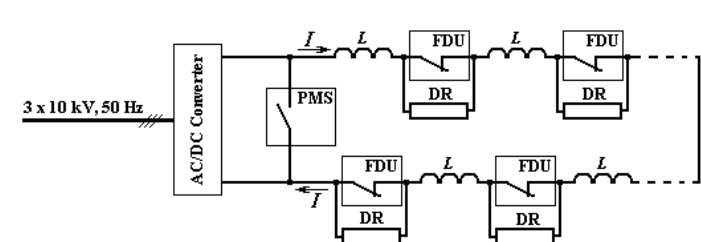


Рис. 4. Эквивалентная схема питания сверхпроводящих катушек тороидального поля (TF)

При возникновении аварийной ситуации быстрый защитный вывод энергии обеспечивается замыканием контура катушек с помощью мощного контактора (PMS) и переключением тока в разрядные резисторы (DR) посредством размыкания контакторов, входящих в состав Fast Discharge Units (FDU).

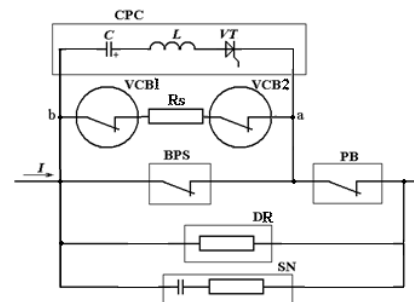


Рис. 5. Схема силовых цепей TF FDU

Для сверхпроводящей магнитной системы тороидального поля (TF), где направление тока в сверхпроводящих магнитных системах не изменяется, применяются униполярные TF FDU (рис. 5);

Для сверхпроводящих магнитных систем полоидального поля (PF) и центрального соленоида (CS), где направления тока в сверхпроводящих магнитных системах изменяется во время цикла работы реактора, применяются биполярные (реверсивные) PF/CS FDU (рис. 6).

При размыкании FDU сначала размыкаются силовые контакты выключателя с пневматическим приводом BPS и ток переходит в цепь вакуумных размыкателей VCB. Затем, после размыкания

В ИТЭР имеется несколько сверхпроводящих магнитных систем, которые создают постоянные или медленно меняющиеся сильные магнитные поля с общей энергией более 40 ГДж. Эквивалентная схема рис. 4 иллюстрирует цепи питания и защитного вывода энергии сверхпроводящих катушек. При

FDU включает в себя двухступенчатый коммутационный аппарат (Switchgear, SWG) и ряд дополнительных устройств, обеспечивающих функционирование системы. В проекте ИТЭР используются FDU двух типов:

- Для сверхпроводящей магнитной системы тороидального поля (TF), где направление тока в сверхпроводящих магнитных системах не изменяется, применяются униполярные TF FDU (рис. 5);
- Для сверхпроводящих магнитных систем полоидального поля (PF) и центрального соленоида (CS), где направления тока в сверхпроводящих магнитных системах изменяется во время цикла работы реактора, применяются биполярные (реверсивные) PF/CS FDU (рис. 6).

контактов VCB загорается дуга между контактами VCB. Для гашения дуги через VCB пропускается импульс встречного тока, который генерируется конденсаторной батареей противотока (CPC).

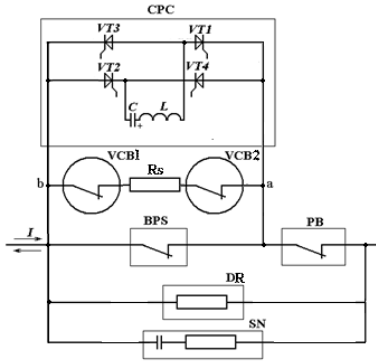


Рис. 6. Схема силовых цепей PF/CS FDU

Эквивалентная схема переходного процесса разряда конденсаторной ячейки (CPC) в FDU представлена на рис. 7. Было найдено аналитическое решение и выведены формулы для тока разряда конденсатора  $I_C$  и напряжения на конденсаторе  $U_C$ . Построенные по этим формулам зависимости от времени токов и напряжений при переключении тока из VCB в DR при параметрах FDU приведены на рис. 8.

Полученное решение позволило определить параметры переходного процесса, амплитуду, заряд и интеграл действия импульса разрядного тока конденсаторной ячейки. Значения этих параметров не превышают величин при разряде в режиме короткого замыкания. Это стало основанием применения режима короткого замыкания для испытания элементов ячеек конденсаторных и для выбора полупроводниковых коммутаторов FDU.

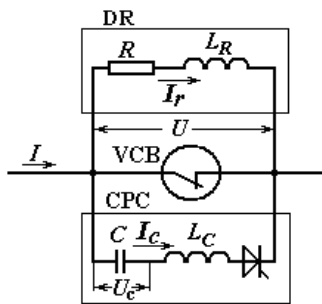


Рис. 7. Эквивалентная схема переключения тока из VCB в разрядный резистор DR

Предельные токовые нагрузки тиристоры и фототиристоры исследовались Р.Ш. Еникеевым и автором на специальном созданном для этого стенде. Была разработана и использована методика определения максимальных значений амплитуды импульсного тока, коммутируемого заряда и интеграла действия импульса тока, при которых появляется термогенерационный пик на осциллограммах прямого падения напряжения на полупроводниковых приборах. Это позволило обосновать применение выбранных тиристоры и фототиристоры в батареях противотока ИТЭР при разрядных токах до 100 кА.

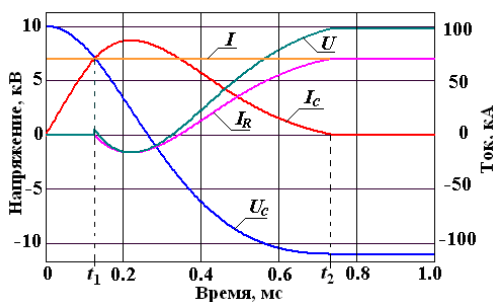


Рис. 8. Токи и напряжения в переходном процессе гашения дуги в FDU. Параметры элементов эквивалентной схемы рис. 7:  $C = 1.6 \text{ мкФ}$ ,  $L_C = 16 \text{ мкГн}$ ,  $L_R = 2 \text{ мкГн}$ ,  $R = 0.14 \text{ Ом}$ ,  $I = 70 \text{ кА}$ ,  $U_{C,0} = 10 \text{ кВ}$

Выполненные исследования процесса обратного восстановления полупроводниковых приборов позволили установить и обосновать параметры снабберных цепей для подавления перенапряжений при выключении полупроводниковых коммутаторов. Были использованы R-C-D снабберные цепи для подавления импульсных перенапряжений в момент обратного восстановления. Для этих снабберных цепей характерно отсутствие опасного для фототиристоры разряда конденсаторы снабберной цепи в момент включения.

Включение фототиристоры может затянуться и протекать неустойчиво из-за ограничения анодного тока внешней индуктивностью и недостаточной величины этого тока для работы усилителей во внутренней структуре фототиристоры в начале разрядного процесса. Предложено и экспериментально обосновано использование форсирующих R-C цепей, которые снабжают

необходимым током внутренние усилители фототиристора и обеспечивают быстрый и устойчивый переход полупроводниковой структуры в проводящее состояние.

Ресурсные испытания фототиристоров (5000 импульсов), выполненные на специально созданном для этого стенде, доказали отсутствие деградации полупроводниковой структуры при коммутации тока амплитудой не менее 100 кА.

Уверенное включение фототиристоров возможно только при мощности запускающего импульса света порядка 150 – 300 мВт. Уменьшение мощности запускающего импульса света неизбежно приведет к выходу из строя не только одного фототиристора, но и всего блока коммутатора. Для контроля мощности света в тракте запуска фототиристора был разработан метод измерения, основанный на замещении излучателя одиночных импульсов драйвера периодическими импульсами, которые допускают применение сертифицированных средств измерения мощности света. Этот метод обеспечил проверку выходных каналов драйверов и световодных трактов, подводящих импульсы света к фототиристорам, и был включен в программы и методики испытаний блоков коммутаторов и батарей противотока.

Выполненные исследования обосновали надежную работу фототиристоров в батареях противотока ИТЭР. Были созданы средства управления и диагностики для обеспечения надежного и длительного функционирования батарей противотока при длительном воздействии постоянного высокого напряжения.

Созданные образцы ячеек конденсаторных и батарей противотока выдержали многочисленные испытания, в том числе:

- испытания в режиме короткого замыкания, при которых на все элементы действуют максимальные нагрузки;
- испытания при длительном воздействии высокого напряжения;
- испытания в составе FDU.

Прототип батареи противотока 10 кВ выдержал типовые испытания, которые выполнялись с участием представителей организации ИТЭР. Батареи противотока двух типов приняты к серийному производству и допущены к поставке во Францию.

**В третьей главе** описывается разработка компактного емкостного накопителя энергии, предназначенного для работы в жестких условиях эксплуатации.

Работы по созданию компактных емкостных накопителей энергии проводятся с 80-х годов в США, ФРГ, Франции, Великобритании, Израиле, Северной Корее, Китае и других странах.

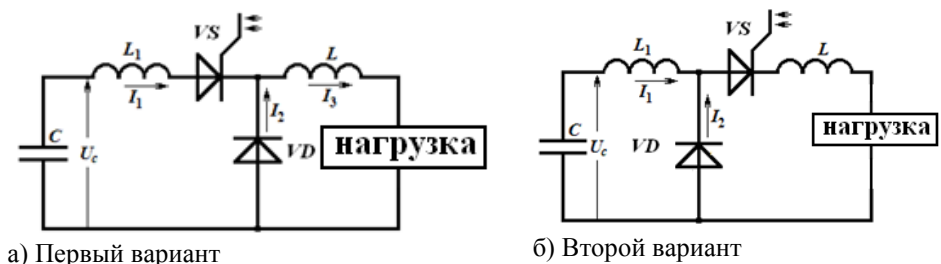


Рис. 9. Возможные эквивалентные схемы разрядного контура конденсаторной ячейки. VS – сборка фототиристоров, VD – сборка кронуарных диодов

Мировой опыт создания компактных емкостных накопителей энергии был использован при создании первой отечественной установки этого класса – малогабаритного емкостного

накопителя энергии, предназначенного для работы в жестких условиях эксплуатации. Для этой установки была выбрана схема (рис. 9а) разрядного контура с формирующей индуктивностью (индуктором)  $L$  и кроубарными диодами  $VD$ , установленными со стороны индуктора.

Переходной процесс разряда в схеме рис. 9а может быть условно разделен на три стадии (рис. 10):

I. Разряд конденсатора  $C$  и заряд индуктивного накопителя  $L$  (процесс включения), при  $0 \leq t \leq t_1 \approx \pi/(2\omega)$ , где  $U_C(t) \approx U_0 \cos(\omega t)$  и  $I_1(t) \approx I_m \sin(\omega t)$ .

II. Переключение тока в кроубарный диод  $VD$  (процесс перехода), при  $t_1 \leq t \leq t_2 \approx t_1 + (\pi/(2\omega_1))$ , где  $I_1(t) \approx I_m \cos[\omega_1(t-t_1)]$ ,  $U_C(t) \approx -I_m(\sqrt{L_1/C}) \sin[\omega_1(t-t_1)]$  и  $I_2(t) \approx I_m \{1 - \cos[\omega_1(t-t_1)]\}$

III. Разряд индуктивного накопителя  $L$  в кроубарном контуре. (Затухание тока на третьей стадии определяется процессом выделения энергии в проводниках индуктора).

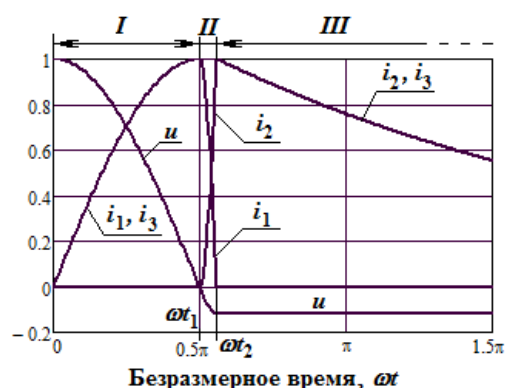


Рис. 10. Переходной процесс при разряде К.З. конденсаторной ячейки рис. 9а.  $C = 6720$  мкФ,  $L = 20$  мкГн — индуктор,  $L_1 = 85$  нГн — индуктивность контура конденсатора и кроубарных диодов

Вычисленные характеристики переходного процесса (таблица 3) были использованы при обосновании режимов работы полупроводникового коммутатора.

Одна из основных проблем при создании современного емкостного накопителя энергии это разработка полупроводникового коммутатора разрядного тока. В работах по созданию компактного емкостного накопителя энергии решение этой проблемы потребовало изготовления многочисленных опытных образцов и их экспериментальных исследований.

Всего было исследовано 7 различных вариантов схемы конденсаторных ячеек и блоков коммутаторов, которые отличались:

- подключением сборки кроубарных диодов по схеме рис. 9а или 9б;
- классом напряжения полупроводниковых приборов и их количеством в сборках (от одного до трех);
- наличием или отсутствиемборок отсекающих диодов;
- применением параллельного соединения фототиристоров;
- вариантами исполнения схем защиты (снабберных, форсирующих и выравнивающих напряжение цепей).

Для всех вариантов исследовались процессы:

- включения фототиристоров;
- перехода тока из фототиристоров в кроубарные диоды;
- выключения фототиристоров;
- весь процесс разряда ячейки конденсаторной.

Выполненные исследования позволили обосновать и окончательно выбрать блок коммутаторов с подключением кроубарных диодов по схеме рис. 9а, для которого характерны минимальный заряд и

интеграл действия импульса тока. Этот блок БКЗТФИ2Д-100000-17,0-Е, изготовленный ОАО «Электровыпрямитель, который состоит из 3-х фототиристоров с классификационным напряжением 4,2 кВ и двух диодов 50 класса, показал стабильную работу в емкостном накопителе энергии (рис. 11).

Таблица 3. Характеристики процесса в контуре рис. 9а.

Амплитуда импульса тока	$I_m \approx 110 \text{ кА}$
Длительность разряда конденсатора	$t_1 \approx 0,5\pi\sqrt{C(L+L_1)} = 577 \text{ мкс}$
Длительность переключения тока в крoубарные диоды	$t_2 - t_1 \approx 0,5\pi\sqrt{CL_1} = 37,5 \text{ мкс}$
Остаточное напряжение на конденсаторе	$U_C(t) \approx -U_0\sqrt{L_1/(L+L_1)} = -390 \text{ В}$
Заряд импульса тока в фототиристорах	$Q = CU_0 = 40,3 \text{ Кл}$
Интеграл действия импульса тока в фототиристорах	$J = \int_0^{t_2} I_1^2(t)dt = 0,5I_m^2t_2 = 3,7 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с}$

Выполненные исследования позволили обосновать и окончательно выбрать блок коммутаторов с подключением крoубарных диодов по схеме рис. 9а, для которого характерны минимальный заряд и интеграл действия импульса тока.



Рис. 11. Блок коммутатора БКЗТФИ2Д-100000-7,0-Е с панелью драйвера

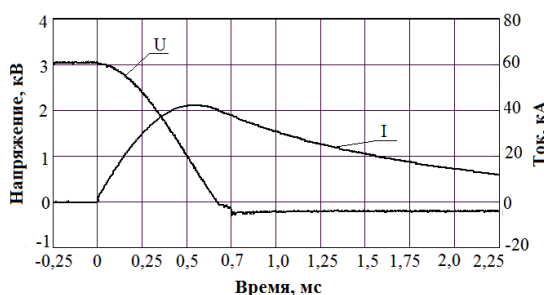


Рис. 12. Ток  $I$  и напряжение на конденсаторе  $U$  при разряде емкостного накопителя на нагрузку 12 мОм

Емкостной накопитель энергии с блоком коммутатора БКЗТФИ2Д-100000-7,0-Е испытывался в режимах К.З., с нагрузочным резистором (рис. 12) и с взрывающейся проволокой в качестве нагрузки. В опытах с

взрывающейся проволокой было показано, что в схеме рис. 9а индуктор и снабберные цепи крoубарных диодов подавляют импульсные перенапряжения и обеспечивают эффективную защиту полупроводникового коммутатора.

Экспериментальный образец компактного емкостного накопителя энергии успешно выдержал все испытания и обеспечил выполнение программы экспериментальных исследований.

**В четвертой главе** изучается проникновение сильного электромагнитного поля в ферромагнитные резистивные элементы типа рис. 13. Задача эта связана с материалом главы второй, где рассматривается процесс коммутации при защитном выводе энергии из сверхпроводящих магнитных систем ИТЭР. Этот процесс коммутации завершается переключением тока в разрядный резистор (DR на рис. 4 – 7). При этом на резисторе возникает напряжение, величина которого зависит от ЭДС самоиндукции, возникающей на фронте импульса тока.

Разрядные резисторы, способные поглотить энергию гигаджоульного диапазона, являются важнейшим элементом системы защиты сверхпроводящих магнитных систем ИТЭР. Разрядные резисторы составлены из секций, соединенных параллельно и последовательно. В секции ток протекает по тонкой металлической полосе, которая свернута в «гармошку», как показано на рис. 13. В качестве резистивного материала в секции применена малоуглеродистая сталь марки Сталь 08.

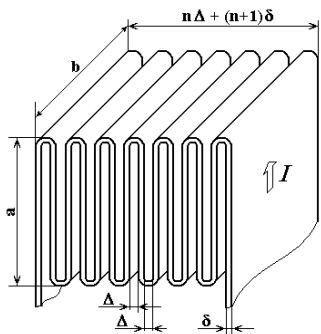


Рис. 13. Устройство резистивного элемента

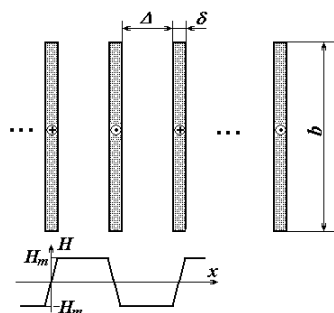
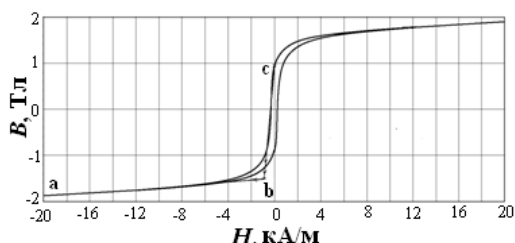


Рис. 14. Упрощенная конфигурация резистора и распределение постоянного поля вдали от краев и изгиба полосы

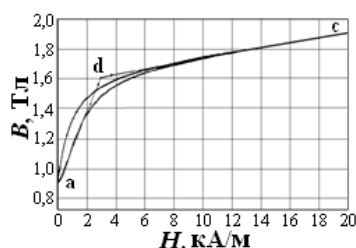
Величина импульсного напряжения, возникающего при переключении тока в разрядные резисторы, определяется внешней индуктивностью контуров этих резисторов и ЭДС самоиндукции, которая возникает на фронте импульса тока при проникновении электромагнитного поля в металл резистивного элемента. Оценка величины этого импульсного напряжения может быть сделана на основе изучения явления проникновения электромагнитного поля в полосу из материала, обладающего ферромагнитными свойствами.

Секция резистора типа рис. 13 может рассматриваться, как набор металлических полос, в которых чередуется направление тока  $I$  (рис. 14). Длина  $l$  и ширина  $b$  каждой полосы во много раз больше, чем расстояние между полосами  $\Delta$  и толщина полосы  $\delta$ . Полос достаточно много и распределение поля около и внутри каждой полосы практически повторяется. Поэтому, для резистора приближенное распределение поля соответствует рис. 14, где поле в металле и зазоре между полосами не изменяется в направлении длины и ширины полосы и периодически повторяется в направлении оси  $x$ .

При постоянном токе напряженность магнитного поля внутри металлической полосы (левой на рис. 14) на достаточном удалении от края и линии изгиба может быть определена из закона полного тока  $H(x) \approx Ix/(b\delta)$ . Максимальное поле достигается в зазоре между металлическими полосами  $H_m = H(\delta/2) = I/(2b)$ . При параметрах секции разрядного резистора ИТЕР ( $\delta = 1$  мм,  $\Delta = 4$  мм,  $b = 580$  мм,  $\gamma = 1/(14,5 \cdot 10^{-8})(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$  – электрическая проводимость материала резистивного элемента) погонная индуктивность полосы  $L' = L'_e + L'_i = 4,514$  нГн/м, где  $L'_e = (\mu_0\Delta)/(2b) = 4,333$  нГн/м – внешняя и  $L'_i = (\mu_0\delta)/(12b) = 0,181$  нГн/м – внутренняя погонные индуктивности. Погонное сопротивление полосы  $R' = 1/(\gamma\delta b) = 0,25$  мОм/м.



а) предельная петля гистерезиса



б) частная петля гистерезиса для намагничивающего тока одной полярности

Рис. 15. Кривые намагничивания Стали 08

Были измерены магнитные свойства резистивного материала. Для этого использовались образцы в виде полос с размерами  $580 \times 40 \times 1$  мм, вырезанные из рулона листовой стали в направлении поперек проката. Из этих полос был навит тороидальный магнитопровод; при этом полосы укладывались таким образом, чтобы конец одной полосы примыкал к началу следующей. На магнитопровод и оправку были намотаны две тороидальные обмотки: измерительная обмотка и обмотка намагничивания.

Характеристики намагничивания получены индукционным методом на стенде для магнитных измерений НИИЭФА при малой скорости изменения тока намагничивания, в условиях, когда практически отсутствуют вихревые токи и малы добавочные динамические потери при перемагничивании стали.

На фронте импульса тока, протекающего в разрядном резисторе, возможны два варианта намагничивания резистивного материала:

а) если направление тока противоположно направлению тока в предыдущем импульсе, то намагничивание происходит по предельной петле (рис. 15а) от точки «а» вниз по левой ветви петли гистерезиса;

б) если направление тока совпадает с направлением тока в предыдущем импульсе, то намагничивание происходит по частной петле (рис. 15б) от точки «а» вверх по правой ветви петли гистерезиса.

Была принята аппроксимация кривой намагничивания (рис. 15), состоящая из двух линейных участков; а-в-с для варианта «а» и а-d-с для варианта «б». При этом не учитывались добавочные потери, которые зависят от скорости изменения индукции магнитного поля при импульсном намагничивании.

Процесс проникновения импульсного магнитного поля в металл резистивного элемента состоит из трех последовательных стадий:

- Начальная стадия до насыщения поверхностных слоев металла,
- Стадия насыщения, при которой волна тока распространяется вглубь металла,
- Стадия проводимости, при которой ток распределен равномерно по сечению полосы и падение напряжения определяется сопротивлением и индуктивностью резистора на постоянном токе.

Для всех трех стадий были получены приближенные зависимости, которые позволяют оценить влияние ферромагнитных свойств резистивного материала на электрические переходные процессы в цепях с резисторами.

Были выполнены эксперименты с макетным образцом одной секции резистора. В качестве источника импульсного тока использовалась конденсаторная батарея 5 кВ, 35 кДж. Импульс тока разряда конденсаторной батареи был близок по форме к одной полуволне синусоиды, длительностью 500 - 550 мкс (рис. 16 и рис. 17).

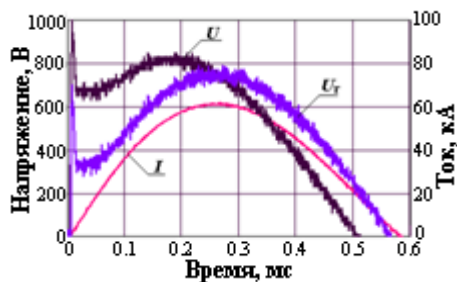


Рис. 16. Ток  $I$ , напряжение на резисторе  $U$  и диффузионная составляющая напряжения  $U_r$  в опыте без изменения направления тока

В опытах (рис. 16 и 17) измерялись ток  $I$ , падение напряжения на резисторе  $U$  и производная тока  $I' = (dI)/(dt)$ . При обработке осциллограмм вычислялась составляющая напряжения на резисторе, обусловленная процессом диффузии магнитного поля в металл  $U_r = U - L_e I'$ . Осциллограммы тока и напряжения типа рис. 16 и 17 подтвердили наличие трех стадий процесса диффузии магнитного поля в материал резистора.

На первой стадии в течении короткого времени (около 5 мкс для опыта рис. 16 и около 20 мкс для опыта рис. 17) имеет место практически линейное возрастание



напряжения на резисторе до величины, близкой к максимальному напряжению, наблюдаемому в опыте.

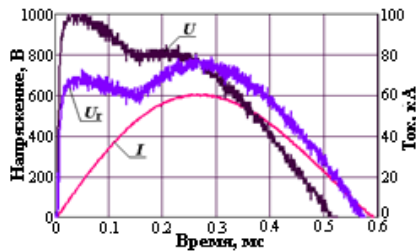


Рис. 17. Ток  $I$ , напряженит на резисторе  $U$  и диффузионная составляющая напряжения  $U_T$  в опыте с изменением направления тока

На второй стадии длительностью 60 мкс для опыта рис. 16 и 150 мкс для опыта рис. 17, при которой волна тока распространяется вглубь металла, наблюдается на осциллограмме участок с малым изменением или небольшим убыванием напряжения на резисторе.

На третьей стадии, при которой распределение тока выравнено по сечению полосы, кривые напряжения совпадают с кривыми переходного процесса разряда конденсатора на линейный элемент электрической цепи с индуктивностью и сопротивлением, соответствующим параметрам резистора на постоянном токе.

Выполненные исследования показали, что в условиях работы разрядного резистора ИТЭР ферромагнитные свойства резистивного материала проявляются только в начальной стадии разряда и не приводят к появлению опасных перенапряжений. Для практической оценки падения напряжения на этих резисторах можно использовать параметры резистора (индуктивность и сопротивление) на постоянном токе.

**В заключении** кратко изложены результаты работы.

1. Разработаны стенды и методы экспериментального исследования для испытаний полупроводниковых коммутаторов больших импульсных токов и их элементов, которые имели существенное значение при создании современных емкостных накопителей энергии.

2. Выполненные исследования электрических переходных процессов в разрядных контурах компактных емкостных накопителей энергии и в системе защитного вывода энергии ИТЭР, в том числе с учетом нелинейных свойств нагрузки, определили режимы работы полупроводниковых приборов и обосновали условия надежной эксплуатации конденсаторных установок.

3. Результаты проведенных исследований имели существенное значение для создания современных емкостных накопителей энергии. Это подтверждено опытом разработки полупроводниковых коммутаторов на основе РВД и фототиристоров с уникальными параметрами: максимальным напряжением от 6 до 18 кВ и током от 50 до 120 кА, которые отличаются от газоразрядных коммутаторов высокой надежностью, экологичностью и простотой обслуживания. Созданные коммутаторы вошли в состав трех типов емкостных накопителей энергии, которые прошли приемо-сдаточные испытания, сданы в эксплуатацию или допущены к серийному производству для ИТЭР.

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

1. Серебров, Р.А. Емкостной накопитель энергии 1 МДж / В.Е. Fridman, Baoming Li, В.А.Беляков, Р.Ш. Еникеев, Н.А.Коврижных, Ю.Л. Крюков, А.Г.Рошаль, Р.А.Серебров. // Приборы и техника эксперимента. - 2011. - №5. - С. 101-105 (рекомендовано ВАК РФ).
2. Серебров, Р.А. Нелинейный скин-эффект в разрядном резисторе системы защитного вывода энергии ИТЭР. / Б.Э. Фридман, Р.А. Серебров // Известия Российской Академии наук. Энергетика. – 2013. - №5. - С. 44-58 (рекомендовано ВАК РФ).

**3. Серебров, Р.А. Разработка и исследование коммутаторов больших импульсных токов на основе фототиристоров / Б.Э. Фридман, Р.А. Серебров, В.А. Мартыненко, А.А. Хапугин // Электротехника. – 2016 - №7. - С. 35-43 (рекомендовано ВАК РФ).**

#### **Публикации, индексируемые в базах Scopus и Web of Science**

4. Serebrov, R. 0.5MJ 18kV module of capacitive energy storage / B.E. Fridman, R.S. Enikeev, N.A. Kovrizhnykh, K.M. Lobanov, R.A. Serebrov // Digest of technical papers of 17th IEEE 2009 Pulsed Power Conference. – Washington. - DC June 28 - July 2. – 2009. - P. 61 – 65.
5. Serebrov, R. A 0.5- MJ 18-kV Module of Capacitive Energy Storage / B.E. Fridman, R. Enikeev, S. Korotkov, N. Kovrizhnykh, K. Lobanov, R. Serebrov // IEEE Transactions on Plasma Science. - March. - 2011. - Vol. 39. - No. 2. - P. 769-774.
6. Serebrov, R. Semiconductor Switches in Counter Pulse Capacitor Bank / B. Fridman R. Enikeev, R. Serebrov // IEEE Pulsed Power Conference. - Digest of Technical papers. – Chicago. - 19 - 23 June. – 2011. - P. 1542 – 1548.
7. Serebrov, R. Capacitor Bank for Fast Discharge Unit of ITER Facility / B.E. Fridman, R. Enikeev, N. Kovrizhnykh, A. Pekhotnyi, A. Roshal, R. Serebrov, K. Kharcheva // IEEE Pulsed Power Conference. - Digest of Technical papers. – Chicago. - 19-23 June. – 2011. - P. 1536-1541.
8. Serebrov, R. 1MJ Pulsed Current Source / B.E. Fridman, Baoming Li, V.Belyakov, R.Enikeev, N.Kovrizhnykh, Yu.Kryukov, A.Roshal, R. Serebrov // IEEE Pulsed Power Conference. - Digest of Technical papers. – Chicago. - 19-23 June. – 2011. - P. 135-139.
9. Serebrov, R. Counter pulse capacitor bank for 70kA, 10 kV commutation systems / B. Fridman, R. Enikeev, K. Kharcheva, N. Kovrizhnykh, R. Serebrov // IEEE Pulsed Power Conference. - Digest of Technical Papers. - San Francisco. - 16-22 June. – 2013. - P. 784-789.
10. Serebrov, R. Nonlinear skin-effect in the discharge resistors fabricated from type of low-carbon steel / B. Fridman, R.A. Serebrov // IEEE Pulsed Power Conference. - Digest of Technical Papers. – 2013. - San Francisco. - 16-22 June. - P. 1738-1744.
11. Serebrov, R. Semiconductor Switches in a Counterpulse Capacitor Bank / R. Serebrov, R. Enikeev, B. Fridman // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2013. Vol. 41. - No. 1. - P. 250 – 256.
12. Serebrov, R. Nonlinear Skin Effect in the Discharge Resistors fabricated from a Low Carbon Steel / B.E. Fridman, R.A. Serebrov // IEEE Transaction on Plasma Science. - 2014. - Vol. 42. - No. 10. - P. 3129 – 3136.
13. Serebrov, R. Development and Research of Heavy Pulse Current LTT Switch / B. Fridman, R. Serebrov, A. Khapugin, V. Martynenko // IEEE Transaction on Plasma Science. – 2016. - Vol. 44. - No. 7. - P. 1195-1201.

#### **Публикации в других изданиях**

14. Serebrov, R. Development and Investigations of Light Triggered Thyristors for Pulse Application / V.V. Chibirkin, V.A. Martynenko, A.A. Khapugin, A.V. Konuchov, S.A. Tundykov, A.V. Grishanin, R.Sh. Enikeev, R.A. Serebrov // PCIM Europe 2011. - 17-19 May. – 2011. – Nurnberg. – Germany. - P. 640-645.
15. Serebrov, R. Light Triggered Thyristors in Capacitor Banks of Fast Discharge Units of Superconductive Magnet Systems. / R.A. Serebrov, R.Sh. Enikeev, B. Fridman // Book of Abstracts of 4th Euro-Asian Pulsed Power Conference and 19th International Conference on High-Power Particle Beams. - September 30. - October 4. – 2012. – Karlsruhe. – Germany. - Paper O7A-3. - P. 190.
16. Serebrov, R. Heavy pulse currents LTT switch unit / B. Fridman, V. Martynenko, A. Khapugin, R. Serebrov // Abstract book of PPC. - Brighton. - 18-22 July. – 2017. - Abstract 30.