

ОТЗЫВ

официального оппонента Фролова Владимира Яковлевича на диссертационную работу Жмодикова Александра Леонидовича на тему: «Разработка и исследование мощных импульсных устройств на основе кремниевых полупроводниковых приборов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки.

Актуальность темы диссертационной работы

В настоящее время устройства, способные коммутировать мощные импульсы тока с микросекундной или субмикросекундной длительностью фронта, используются во многих отраслях науки и техники (питание импульсных лазеров, очистка воды и воздуха от вредных примесей, очистка деталей после обработки, магнитная штамповка и т.д.). Для генерации импульсов тока большой амплитуды, нарастающих с большой скоростью, требуются ключи, способные блокировать высокое рабочее напряжение, имеющие очень малое время переключения в хорошо проводящее состояние и способные коммутировать ток большой величины. В последние десятилетия в качестве таких ключей широко используются коммутаторы на основе полупроводниковых приборов.

Диссертационная работа Жмодикова А. Л. направлена на исследование различных кремниевых полупроводниковых приборов и на разработку на их основе устройств, способных эффективно коммутировать импульсы тока с большой амплитудой и с микросекундной или субмикросекундной длительностью фронта. В работе представлены результаты исследования приборов, которые производятся промышленным способом, как импортные – биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT), так и отечественные: силовые тиристоры (СТ), интегральные тиристоры (ИТ),

импульсные интегральные тиристоры (ИИТ) и реверсивно включаемые динисторы (РВД).

Результаты исследований перечисленных выше полупроводниковых приборов показывают, что при определенных параметрах запускающих сигналов они могут быть эффективно использованы в малоизученных режимах коммутации мощных импульсов с высокой скоростью нарастания тока и могут надежно работать в этих режимах при последовательном соединении. В работе представлены разработанные цепи запуска приборов, которые обеспечивают требуемые параметры запускающих сигналов. Коммутаторы с рабочим напряжением десятки киловольт, разработанные на основе сборок полупроводниковых приборов, соединенных последовательно, показали высокую надежность. Эти коммутаторы и генераторы на их основе применяются в различных компаниях и научных организациях, как российских, так и иностранных.

Таким образом, тема данной диссертационной работы является актуальной.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы. Работа содержит 131 страницу машинописного текста и 126 рисунков. Список использованной литературы включает 89 наименований.

Во введении автор формулирует цель работы, обосновывает её актуальность, представляет научную новизну и практическую значимость выносимых на защиту результатов и кратко излагает содержание диссертационной работы.

Первая глава является обзорной. В ней рассмотрены проблемы и перспективы использования в мощных импульсных устройствах электроразрядных ключей, традиционных полупроводниковых ключей, а также

недавно разработанных в ФТИ им. А. Ф. Иоффе интегральных тиристоров (ИТ) и реверсивно включаемых динисторов (РВД).

Вторая глава посвящена устройствам на основе биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT), малогабаритных силовых тиристоров (СТ) и недавно разработанных интегральных тиристоров (ИТ). В главе представлены результаты исследований этих приборов в нетрадиционных для них режимах коммутации мощных импульсов тока с субмикросекундным фронтом нарастания. Рассмотрена конструкция модернизированных интегральных тиристоров – импульсных интегральных тиристоров (ИИТ). Описаны мощные импульсные устройства на основе высоковольтных ключей в виде блоков последовательно соединенных IGBT, СТ и ИИТ.

Третья глава посвящена работе коммутаторов на основе РВД. Приведены результаты исследований переключения РВД с различным диаметром полупроводниковых структур с помощью очень короткого импульса тока управления с длительностью существенно меньше 1 микросекунды, что является для них нетрадиционным режимом. Показано, что при коммутации быстро нарастающих импульсов тока коммутационные потери энергии в исследуемых РВД практически не изменяются при уменьшении длительности тока управления с традиционного микросекундного уровня до субмикросекундного, если не изменяется величина заряда, пропускаемого через РВД при протекании тока управления. Описан малоиндуктивный РВД-коммутатор с рабочим напряжением 16 кВ, способный коммутировать микросекундные импульсы тока с амплитудой ~180 кА, нарастающие со скоростью ~40 кА/мкс, что является уникальным сочетанием для полупроводниковых приборов. Представлены результаты исследований РВД, модернизированных с целью повышения их коммутационных возможностей при пропускании через них тока в обратном направлении, и показано, что падение напряжения на них при протекании обратного тока в 2,2 раза меньше, чем на базовых РВД.

Четвертая глава посвящена мощным импульсным устройствам на основе силовых тиристоров и биполярных транзисторов с изолированным затвором. Представлен высоковольтный тиристорный генератор импульсов магнитного поля, позволяющий на частоте 10 Гц формировать в катушке с индуктивностью 0,8 мГн импульсы тока с амплитудой 12 кА и фронтом 1 мкс. Описан 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. Рассмотрен мощный транзисторный генератор высоковольтных электрических разрядов, способный на частоте 500 Гц при уровне напряжения 30 кВ формировать импульсы разрядного тока с амплитудой ~500 А и фронтом ~150 нс и обеспечивающий высокую эффективность использования «отраженной от нагрузки энергии» без применения традиционных дополнительных цепей рекуперации. Представлен мощный тиристорный генератор с выходным током до 200 кА, предназначенный для исследования коммутационных возможностей РВД в условиях промышленного производства.

Пятая глава посвящена мощным импульсным устройствам на основе РВД. Описаны мощные коммутаторы на основе блока последовательно соединенных РВД с рабочим напряжением 12 кВ и 24 кВ, способные коммутировать импульсы тока с амплитудой до 300 кА, длительностью несколько сотен мкс и фронтом ~100 мкс. Представлен генератор мощных ударных волн в воде с энергоемкостью 100 кДж, способный разрушать бетонные блоки объемом до 1 м³. Приведены результаты использования разработанных высоковольтных коммутаторов на основе РВД, дросселей насыщения и блоков запуска РВД в генераторах с энергоемкостью ~0,8 МДж, предназначенных для создания мощных импульсов тока предионизации ксеноновых ламп в системах питания мощных неодимовых лазеров и последующей накачки этих ламп импульсами тока с амплитудой ~250 кА и длительностью ~400 мкс.

В заключении сформулированы основные результаты проделанной работы и показаны возможности дальнейшего повышения выходной мощности разработанных импульсных устройств.

Научная новизна

В диссертационной работе получены новые результаты, в частности:

- 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;
- результаты исследований модернизированных РВД, показывающие, что падение напряжения на них при протекании обратного тока в 2,2 раза меньше, чем на базовых РВД, что определяет возможность использования модернизированных РВД для коммутации мощных знакопеременных импульсов тока;
- результаты исследований мощных РВД, свидетельствующие о том, что их коммутационные возможности в режиме коммутации импульсов тока с субмикросекундным фронтом существенно превосходят возможности тиристоров с той же площадью полупроводниковой структуры.

Степень обоснованности и достоверности научных положений и выводов

Защищаемые положения, изложенные в диссертации и автореферате, являются достоверными и обоснованными с научной точки зрения, а выводы основаны на экспериментальных результатах, полученных с использованием современных методов измерения импульсных токов и напряжений. Для этих целей использовались цифровые осциллографы Tektronix и высоковольтные калиброванные датчики напряжения и тока. Для моделирования процессов, протекающих в электрических схемах, использовались компьютерные программы.

Научные результаты, изложенные в диссертации, были опубликованы в соавторстве в 17 статьях в рецензируемых журналах, а также доложены на пяти международных конференциях. Данные работы полностью отражают результаты исследований, приведенные в диссертации.

Замечания

По содержанию диссертационной работы имеются следующие замечания:

- 1) В диссертации не представлен подробный анализ развития подобной тематики за рубежом;
- 2) на некоторых фотографиях разработанных устройств не указан масштаб, что затрудняет оценку их размеров (рис. 2.8, 2.13, 2.25, 3.16, 3.21, 4.3, 4.4, 4.7, 4.8, 4.16, 4.23, 5.2, 5.4, 5.9, 5.11, 5.15, 5.17, 5.18, 5.21, 5.22, 5.24);
- 3) Формулировка второго положения, выносимого на защиту, где говорится об «отражении энергии от нагрузки» имеет неточность физического понимания процесса, т.к. речь не идет о волновых процессах. В данном случае правильнее говорить о реактивной мощности, но она в указанном временном интервале вряд ли несет заявляемый результат.

Указанные замечания не являются принципиальными и не уменьшают общей ценности диссертационной работы.

Заключение

Диссертация Жмодикова А. Л. представляет собой завершенную работу, которая содержит научно обоснованные решения, внедрение которых позволит упростить разработку генераторов мощных импульсов тока с микросекундной и субмикросекундной длительностью фронта на основе серийных полупроводниковых приборов, что имеет существенное значение для развития страны.

Текст автореферата соответствует защищаемым положениям диссертации.

По поставленным задачам и полученным результатам диссертация полностью соответствует профилю научной специальности 01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки.

Основные результаты работы докладывались на пяти международных конференциях и отражены в 17 статьях, опубликованных в журналах, которые входят в список ВАК или индексируются в базах данных Scopus и Web of Science.

Считаю, что диссертационная работа представляет собой завершенное исследование, имеющее научную ценность и практическую значимость, удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842 (ред. от 11.09.2021), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Жмодиков Александр Леонидович, достоин присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки.

Официальный оппонент:

доктор технических наук, профессор,
Профessor Высшей школы
электроэнергетических систем

Фролов
Владимир Яковлевич

« 7 » сентябрь 2022 г.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Адрес: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

Тел.: 8 (812)552-76-43

Электронная почта: frolov.eed@gmail.com

Адрес сайта: <http://www.spbstu.ru>



Сведения об официальном оппоненте
по диссертации Жмодикова Александра Леонидовича на тему : «Разработка и
исследование мощных импульсных устройств на основе кремниевых
полупроводниковых приборов», представленной
на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности
01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки.

Фамилия имя отчество	Фролов Владимир Яковлевич
Ученая степень	доктор технических наук
Научная специальность	05.09.10 – Электротехнология
Место работы и должность	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»), Институт энергетики, Высшая школа электроэнергетических систем, профессор
Адрес	195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29
Эл. почта	frolov.eed@gmail.com

Список публикаций Фролова В.Я. по теме диссертации за последние 5 лет:

1. Сафонов Е. П., Фролов В. Я., Особенности переходных процессов в генераторных цепях мощных электротехнических комплексов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. – №1. – С. 105-118.
2. Cherenkov V. A., Ivanov D. V., Frolov V. Y., Malavanh O. Increasing the breaking capacity of the 10 kV VAC in comparison with its own axial and radial

magnetic fields // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – No. 1753 (1). – P. 012050-1-6.

3. Герасимов С. Е., Иванов С. А., Кузнецов А. А., Смоловик С. В., Фролов В. Я. Качество электроэнергии, источники и средства компенсации реактивной мощности в электроэнергетических системах. Учебное пособие. СПб, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого. – 2021. – 100 с.

4. Фролов В. Я. Методы оценки энергетической эффективности трансформаторов электрических сетей 6-10 кв // Энергетическая безопасность. Сборник научных статей III Международного конгресса (Курск, 16–17 октября 2020 года). В 2-х томах. – 2020. – С. 259-263.

5. Vostrov K., Frolov V. Application of common-mode-free control topology to a two-level inverter // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Proceedings of International Scientific Electric Power Conference (Saint-Petersburg, 23–24 мая 2019 года) – 2019. – С. 012118.

6. Фролов В. Я., Сурма А. М., Васерина К. Н., Черников А. А. Силовая полупроводниковая элементная база. Технология производства. Конструктивные решения. СПб, «Лань». – 2019. – 228 с.

7. Бельский Р. А., Фролов В. Я., Подпоркин Г. В. Электрическая прочность разрядника для молниезащитных линий 6-35 кВ при грозовых перенапряжениях // Записки Горного института. – 2018. – Т. 232. – С. 404-406.

Официальный оппонент:

доктор технических наук, профессор,
Профессор Высшей школы
электроэнергетических систем
ФГАОУ ВО «СПбПУ»

Фролов
Владимир Яковлевич

« 7 » сентябрь 2022.

