

«УТВЕРЖДАЮ»

Зам. директора Института  
электрофизики УрО РАН  
чл.-корр. РАН, д.т.н.

Н.В. Гаврилов

15 июня 2016 г.



## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу ЛАВРИНОВИЧА Ивана Валерьевича  
«Конденсаторно-коммутаторные сборки с субмикросекундными временами вывода энергии для компактных сильноточных импульсных генераторов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки

Основой развития мощной импульсной техники всегда выступал прогресс в исследовании и усовершенствовании методов накопления и коммутации энергии больших плотностей. В этом аспекте диссертационная работа Лавриновича И.В. представляет собой классический пример, поскольку направлена на создание и исследование сильноточных малоиндуктивных накопительных конденсаторов и конденсаторно-коммутаторныхборок с предельно высокими удельными характеристиками по запасаемой энергии и импульсной мощности для применения в различных приложениях, где необходимо использование мощных электрических импульсов. В частности, такие сборки могут быть использованы в компактных источниках жесткого и мягкого рентгеновского излучения при создании нового диагностического оборудования. Актуальность темы выполненной работы сомнений не вызывает.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложений с общим объемом 127 страниц, содержит 51 рисунок и 11 таблиц. Список цитируемой литературы включает 109 наименований. Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и основные задачи исследований, их научная новизна, представлены положения, выносимые на защиту. **Первая глава** носит обзорный характер, в ней рассмотрены подходы при построении мощных импульсных генераторов, предназначенных для работы на различные низкоимпедансные нагрузки. Сделан вывод, что в настоящее время наиболее перспективными являются генераторы, построенные на основе емкостных накопителей. Основными требованиями к та-

ким генераторам выступают высокая плотность энергии и удельная импульсная мощность в сочетании с возможностью генерирования в низкоимпедансной нагрузке импульсных токов амплитудой сотни кА с временем нарастания около 100-200 нс.

Во **второй главе** рассматривается газовый искровой канал как основной элемент в цепи разрядного контура генератора, потери энергии в котором в процессе коммутации могут составлять значительную часть от общей первоначально запасенной энергии и, тем самым, значительно влиять на эффективность работы всего генератора. Автором на основе численных расчетов эквивалентной электрической схемы импульсного генератора получены выражения, в которых учитываются как параметры разрядников конденсаторно-коммутаторных сборок, так и количество, схема включения и электрические параметры применяемых сборок. Количественная оценка потерь энергии в разрядниках, проведенная с использованием полученных выражений, совпадает с результатами экспериментальных измерений в пределах 10%. Полученные в этой главе результаты имеют научную новизну, на их основе сформулировано первое защищаемое положение.

В **третьей главе** описаны конструкция и характеристики конденсаторно-коммутаторной сборки, построенной на базе высоковольтного импульсного конденсатора емкостью 200 нФ с зарядным напряжением до 100 кВ и многоазорного газового разрядника. Предложена и реализована оригинальная конфигурация расположения обкладок конденсатора, которая равномерно распределяет электростатический потенциал вдоль изолятора многоазорного газового разрядника. Это позволило создать компактный сильноточный импульсный генератор, способный при работе на индуктивную нагрузку 4 нГн обеспечить ток амплитудой до 170 кА при времени нарастания 120 нс. Сборка разработана для применения в компактном импульсном генераторе тока, предназначенном для работы на X-пинч нагрузку. По результатам этой главы формулируется второе защищаемое положение.

**Четвертая глава** посвящена разработке конденсаторно-коммутаторной сборки, в которой в качестве коммутатора используется тригatronный разрядник. Не смотря на некоторое увеличение индуктивности сборки по сравнению с многоазорным разрядником, в реализованном варианте достигнуты рекордные по сравнению с известными сборками значения абсолютного и удельного энергозапаса – 800 Дж и 0.124 Дж/см<sup>3</sup> соответственно, а также наибольшее значение максимальной выходной мощности – 5.5 ГВт. На основе разработанной сборки создан компактный сильноточный генератор, содержащий 4 парал-



тельно работающие сборки. В режиме короткого замыкания достигнута амплитуда разрядного тока 370 кА с временем нарастания 180 нс. На основе результатов этой главы сформулировано третье защищаемое положение.

В заключительной **пятой главе** приводятся результаты разработки и испытаний компактного генератора высоковольтных импульсов. Показано, что совместное применение малоиндуктивного линейного импульсного трансформатора и конденсаторно-коммутаторной сборки позволяет создать компактный импульсный генератор, обеспечивающий напряжение амплитудой до 750 кВ и длительностью на полувывоте 70 нс в зазоре вакуумного диода с импедансом 250-300 Ом. Разработанный генератор был использован в составе малогабаритного источника жесткого рентгеновского излучения с энергией квантов  $\sim 125$  кэВ с размером излучающей области менее 2 мм и длительностью рентгеновского импульса на полувывоте около 40 нс. Результаты работы, изложенные в этой главе, обладают научной новизной и сформулированы в четвертом защищаемом положении.

Анализ материала диссертации Лавриновича И.В. показал, что научная новизна присутствует во всех положениях, вынесенных автором на защиту, а автореферат в достаточной степени отражает содержание диссертации. Результаты работы опубликованы в 5 статьях в отечественных рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ, а также в 13 докладах, опубликованных в трудах международных и всероссийских конференций и симпозиумов. Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы подтверждена с одной стороны, хорошим совпадением экспериментальных и расчетных зависимостей, и с другой, практической реализацией научных положений и выводов при проектировании и создании компактных сильноточных генераторов.

Научная и практическая ценность работы также очевидна. Разработанные конденсаторно-коммутаторные сборки могут быть использованы при создании компактных сильноточных наносекундных генераторов, в частности, для питания источников жесткого и мягкого рентгеновского излучения. Результаты работы уже нашли практическое применение, они используются в ряде учреждений России: ФИАН (г. Москва), ГНЦ РФ ТРИНИТИ (г. Троицк), ИГиЛ СО РАН (г. Новосибирск), Институт сильноточной электроники СО РАН (г. Томск), Национальный исследовательский Томский политехнический университет (г. Томск). Результаты работы могут быть использованы и в других академических и отраслевых организациях.

Как и любой объемный научный труд, диссертация Лавриновича И.В. не свободна от некоторых погрешностей.

1. Не достаточно четко аргументирована целесообразность перехода от многозачорного разрядника в конденсаторно-коммутаторной сборке к разряднику тригatronного типа, поскольку при близких параметрах емкости и рабочего напряжения сборок многозачорный разрядник позволяет реализовать в 1.5 раза меньшую индуктивность сборки – 20 нГн вместо 30 нГн.
2. При параллельной работе сборок на общую нагрузку, что реализовано в 4-х канальном генераторе с током 370 кА и в генераторе на основе ЛИТ, важным параметром выступает время срабатывания разрядника и его разброс. К сожалению результатов измерения этих величин в диссертации не приведено. Также не указан диапазон работы разрядников по напряжению, при котором реализуется синхронная работа параллельных каналов.
3. Для разработанных генераторов не приведены значения потерь энергии в разряднике, определяющие энергетическую эффективность работы сборок. Было бы логичным для оценки потерь применять выражение, полученное во второй главе диссертации.

Несмотря на указанные замечания, работа Лавриновича И.В. безусловно заслуживает положительной оценки. Полученные им результаты могут быть в совокупности квалифицированы как существенный вклад в развитие высоковольтной импульсной техники. Диссертация Лавриновича И.В. представляет собой законченный научный труд, соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор несомненно заслуживает присвоения ему искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки.

Работа заслушана на расширенном семинаре лаборатории импульсной техники Института электрофизики Уральского отделения РАН 15 июня 2016 г., протокол № 6.

Заведующий лабораторией импульсной техники  
Института электрофизики УрО РАН, д.т.н.  
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 106

С. Н. Рукин

Старший научный сотрудник  
лаборатории импульсной техники  
Института электрофизики УрО РАН, к.ф.-м.н.  
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 106

С. Н. Цыранов