

*На правах рукописи*

ШВЕДОВ Дмитрий Александрович

БЫСТРЫЕ СИСТЕМЫ ВПУСКА-ВЫПУСКА  
ДЛЯ УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

01.04.20 - физика пучков заряженных частиц  
и ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

НОВОСИБИРСК – 2009

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

ЛЕВИЧЕВ  
Евгений Борисович – доктор физико-математических наук,  
Учреждение Российской академии наук  
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера  
Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

КУКСАНОВ  
Николай Константинович – доктор технических наук,  
Учреждение Российской академии наук  
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера  
Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск.

КРОТОВ  
Станислав Владиславович – кандидат технических наук,  
Учреждение Российской академии наук  
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе  
Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск.

ВЕДУЩАЯ  
ОРГАНИЗАЦИЯ: – Учреждение Российской академии наук  
Институт электрофизики Уральского  
отделения РАН, г. Екатеринбург.

Защита диссертации состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2009 г.  
в «\_\_\_\_\_» часов на заседании диссертационного совета Д.003.016.01  
Учреждения Российской академии наук Института ядерной физики  
им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск,  
проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Института ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук

А.В. Бурдаков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Для реализации впуска и выпуска пучков заряженных частиц в циклических ускорителях часто используется каскадная схема с однооборотной инжекцией частиц из ускорителя-инжектора в промежуточное накопительное кольцо (или синхротрон-бустер) и с однооборотным выпуском и инжекцией в основное накопительное кольцо.

Задачи однооборотного впуска-выпуска выполняются с помощью специальных наносекундных устройств, входящих в состав систем впуска-выпуска заряженных частиц.

Для циклических ускорителей с периметром порядка 100 м повышаются требования к времени установления удара по пучку с помощью импульсного отклоняющего устройства - кикера. Для получения высокой эффективности перепуска время установления удара в кикере, определяемое длительностью фронта электрического импульса, размерами и свойствами отклоняющего устройства, должно быть минимальным. В современных ускорителях и накопителях, в большинстве случаев применяется высокая кратность ускоряющего высокочастотного напряжения (180, 300 и 500 МГц) и работа с большим числом сгустков. Такие режимы в основном используются на комплексах СИ для получения максимальных электронных токов, а так же в экспериментах со встречными пучками для повышения светимости. При этом важной задачей является заполнение сгустками частиц всей орбиты ускорителя.

Вместе с этим существуют задачи, где необходимо осуществлять выпуск отдельных банчей, не возмущая при этом соседние сепаратрисы. Так же в настоящее время актуальным стало создание ионно-протонных ускорительных комплексов для медицинских целей, в частности для терапии раковых заболеваний. В таких установках ставятся задачи так называемого «порционного выпуска» частиц для локального облучения злокачественных опухолевых образований. Для таких целей так же применяются быстрые кикеры, в которых необходимо иметь наносекундные импульсы с формой, близкой к прямоугольной и длительностью от единиц до нескольких сотен наносекунд при скорости переходных процессов не более единиц наносекунд. В таких задачах используются кикеры в виде полосковых линий с различной геометрией, расположенные внутри вакуумной камеры ускорителя. Такие кикеры, обычно, работают в режиме бегущей волны, когда воздействующее на пучок поле включает и электрическую, и магнитную компоненты (E и H). Пластины кикеров при этом согласованы с питающими генераторами с помощью оконечных согласующих нагрузок, равных волновому сопротивлению подводящих кабельных линий. Достоинство таких режимов в том, что в два раза

снижается нагрузка по напряжению питающих наносекундных генераторов, в отличие, например от чисто электростатического режима. Так же при внутреннем расположении пластин уменьшается рабочая апертура кикера. Использование режима парафазного питания пластин еще вдвое понижает напряжение питающих генераторов. Еще одно достоинство режима бегущей волны состоит в том, что отсутствуют отражения и хвосты от действующих импульсов, что позволяет садить пучок частиц на равновесную орбиту ускорителя с минимальными остаточными колебаниями.

В настоящее время комплексы встречных пучков и источников СИ стали во много раз превышать по своим размерам первоначальные ускорительные установки. С переходом к сверхпроводящим магнитам повышается основное магнитное поле, установки сооружаются на все большие энергии частиц. При этом актуальной задачей становится соблюдение «гладкости» вакуумных камер накопителей, что требует создание магнитных кикеров с внешним расположением проводящих шин и встроенной керамической вакуумной камерой. Но при этом по-прежнему требуется заполнение максимального числа сепаратрис и минимальные потери при последовательных перепусках частиц. Характерные углы отклонения, которые должны создавать такие устройства  $\geq 15$  мрад, а рабочие поля – до 1 кГс. Поэтому, несмотря на то что в современных машинах периоды обращения частиц измеряются уже сотнями и тысячами наносекунд, кикеры и питающие их генераторы по-прежнему должны обеспечивать наносекундное быстроедействие и иметь минимальную нестабильность импульсов по времени. Для получения высоковольтных наносекундных импульсов необходимы генераторы, где в качестве ключевых элементов применяются мощные наносекундные коммутаторы электромагнитной энергии, к которым предъявляются высокие требования по скорости коммутации и временной синхронизации.

Необходимость получения коротких фронтов с хорошей временной стабильностью является актуальной задачей и в мировых ускорительных лабораториях: ускорительном комплексе Ф-фабрика DAΦNE (Италия), комплексе CSR в Китае, В-фабрики КЕК (Япония). Используются различные схемы впуска-выпуска, направленные на повышение эффективности инжекции и перепусков частиц.

Большой опыт работы с высоковольтными, наносекундными коммутаторами накоплен в ИЯФ СО РАН (ВЭПП-3,4, ВЭПП-2000), а так же на специализированных комплексах СИ «Сибирь» (Курчатовский РИЦ) и «ТНК» (Зеленоград). На этих установках в системах впуска-выпуска, для получения минимальных длительностей фронтов импульсов применяются газонаполненные искровые разрядники, которые позволяют иметь времена нарастания импульсов порядка нескольких наносекунд при достаточно большом ресурсе работы. Генераторы на основе таких коммутаторов и питаемые ими кикеры работают в круглосуточном режиме с кратковременными остановками для проведения профилактических работ.

В начале XXI века в России были созданы газоразрядные приборы нового поколения – псевдоискровые коммутаторы (тиратроны с холодным катодом), работающие на основе разряда типа дугового или сверхплотного тлеющего и предназначенные для коммутации токов среднего диапазона с узлом поджига на основе дополнительного тлеющего разряда. Использование таких приборов в системах впуска-выпуска заряженных частиц в ускорителях позволяет повысить эффективность перепусков, а так же существенно расширить диапазон перестройки по энергии. Исходя из этого, актуальным стало применение таких коммутаторов при модернизации системы впуска-выпуска для комплекса лазера на свободных электронах в университете Duke (США). В настоящее время комплекс FEL с новой системой впуска-выпуска функционирует согласно научной программе.

Для выполнения проекта магнитных кикеров и генераторов для специализированного источника СИ «Nanohana» (Япония), были разработаны прототипы магнитных кикеров со встроенными отрезками керамической вакуумной камеры и металлическим напылением внутренней поверхности. Эта работа получила в настоящее время новое развитие при разработке системы впуска-выпуска для ионно-протонных медицинских установок, а так же при создании комплекса «С-Т-Фабрика».

### **Цель работы**

- Основываясь на опыте ИЯФ в разработке высоковольтных наносекундных генераторов на газонаполненных искровых разрядниках разработать и создать системы впуска-выпуска для специализированных комплексов СИ «Сибирь» (Москва, РНЦ «Курчатовский институт») и «ТНК» (НИИФП им. Лукина, Зеленоград).
- Создание новой системы впуска-выпуска для лазера на свободных электронах в университете Duke .
- Разработка проекта системы быстрых магнитных кикеров и генераторов для специализированного комплекса СИ «Nanohana» (Япония).

### **Научная новизна**

- Были разработаны и созданы высоковольтные наносекундные генераторы на трехэлектродных газонаполненных искровых разрядниках с неподвижными электродами. Впервые схема формирования импульсов в генераторе создана на основе двойной коаксиальной формирующей линии с рабочим напряжением до 60 кВ. Электроды формирующей линии выполнены в виде отрезков нержавеющей труб, внутренняя полость которых заполняется азотом под рабочим давлением до 20 МПа. Были разработаны и созданы искровые разрядники с плоскими неподвижными электродами различных модификаций, имеющие рабочий ресурс до нескольких десятков миллионов импульсов.

- Создан высоковольтный тиратронный генератор с рабочим напряжением до 25 кВ на ферритовых линиях, в которых происходит обострение исходного фронта импульса до единиц наносекунд за счет действия ударной волны в феррите.
- Созданы наносекундные генераторы, где в качестве коммутаторов впервые в системе выпуска-выпуска ускорителя были применены псевдоискровые безнакальные тиратроны, в которых создается стационарный сверхплотный тлеющий разряд.
- Был создан проект наносекундных магнитных кикеров и керамических вакуумных камер с металлизированной внутренней поверхностью специальной формы. Смоделированы различные схемы питания кикеров от высоковольтных тиратронных генераторов.

### **Практическая значимость работы**

- Введены в действие система впуска-выпуска заряженных частиц комплекса СИ «Сибирь» и система впуска-выпуска для Малого накопителя «ТНК». На экспериментальных станциях СИ комплекса «Сибирь» в настоящее время проводятся эксперименты с пучком, согласно научной программе. На комплексе «ТНК» в декабре 2002 года запущен линейный ускоритель с энергией 55 МэВ, а в декабре 2007 года получен циркулирующий пучок с энергией 450 МэВ в Малом накопителе. А в апреле 2008 года пучок электронов был выпущен в электронно-оптический канал Большого накопителя.
- На комплексе ВЭПП-2000 улучшена эффективность выпуска частиц из синхротрона Б-3М в основной накопитель за счет использования в системе впуска-выпуска тиратронного генератора с обостряющими ферритовыми линиями.
- Создание новой системы кикеров и генераторов для комплекса FEL в университете Duke привело к повышению эффективности перепусков частиц и реализации побанчевого выпуска из бустера-синхротрона в основное накопительное кольцо с пятикратной перестройкой по энергии. В настоящее время комплекс FEL работает согласно научной программе.
- Разработка проекта магнитных кикеров для комплекса СИ «Nanohana» послужила отправной точкой для создания в ИЯФ магнитных кикеров со встроенной керамической вакуумной камерой, что является в настоящее время актуальным для соблюдения «гладкости» вакуумных камер накопителей и получения максимальных токов. Результаты этого проекта используются в настоящее время для создания системы впуска-выпуска на ферритовых кикерах при разработке ионно-протонного ускорительного комплекса для терапии раковых заболеваний, а так же комплекса С-Т Фабрики.

**Автор выносит на защиту** следующие результаты проделанной работы:

1. Разработаны и созданы биполярные наносекундные генераторы на двойных коаксиальных формирующих линиях с газонаполненными искровыми разрядниками и напряжением до 60 кВ, где в качестве рабочего вещества использован азот. В генераторах введен общий для обеих полярностей тиратронный блок поджига и один импульсный источник питания.
2. Разработаны трехэлектродные газонаполненные искровые разрядники разных модификаций с неподвижными электродами без применения электропривода.
3. Созданы т-образные аттенюаторы на максимальное рабочее напряжение до 60 кВ и коэффициентами деления  $1.5 \div 8$  для получения в нагрузках генераторов заданных амплитуд рабочих импульсов. При этом разрядники выводятся на режимы с напряжением выше 40 кВ, где сохраняется высокая временная стабильность их работы.
4. Разработана и создана новая система впуска-выпуска для комплекса FEL университета Duke (США), в которой в качестве ключевых элементов наносекундных генераторов впервые использованы псевдо-искровые коммутаторы (тиратроны с «холодным» катодом) со сверхплотным тлеющим разрядом.
5. Для комплекса ВЭПП-2000 был создан и введен в эксплуатацию высоковольтный тиратронный генератор с обострением фронта на коаксиальных ферритовых линиях, который позволил увеличить эффективность перепуска из синхротрона БЗМ в основной электронно-позитронный коллайдер ВЭПП-2000.
6. Создан проект быстрых ферритовых кикеров и генераторов для комплекса СИ «Nanohana» (Япония) со встроенной керамической вакуумной камерой с металлизированным напылением.

#### **Апробация работы и публикации**

Основные результаты диссертационной работы докладывались на семинаре в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (Новосибирск, РФ), на Российских и Международных научных конференциях: XVI (July 10-14, 2006, Novosibirsk) International Synchrotron Radiation Conference, Particle Accelerator Conference (1993, 2001, 2003, 2007 гг.), XVII Совещание по ускорителям заряженных частиц, ГНЦ РФ, Институт физики высоких энергий, Протвино, 17-20 октября 2000 г, XX Intern. Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Tours, France, July 1-5, 2002 и др., а также содержатся в статьях в 4-х реферируемых научных журналах. Основные результаты работы представлены в 12 публикациях.

## Структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из (54) наименований, изложена на (163) страницах машинописного текста, содержит (114) рисунков и (18) таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность получения крутых импульсных перепадов при управлении пучками в ускорителях. Рассмотрен мировой опыт по реализации впуска-выпуска в ведущих ускорительных лабораториях: Dafne (Италия), KEK (Япония), CSR (Китай), ILC. Показаны различные варианты конструкций кикеров и режимов их питания.

**В первой главе** диссертации подробно рассмотрены основные типы высоковольтных наносекундных коммутаторов электромагнитной энергии, используемые в генераторах для питания устройств впуска-выпуска заряженных частиц в ускорителях, анализируются особенности их запуска, оцениваются их достоинства и недостатки применительно к получению максимальных скоростей коммутации и временной стабильности.

**Во второй главе** подробно рассматриваются системы впуска-выпуска для специализированных комплексов СИ «Сибирь» (Курчатовский РНЦ) и «ТНК» (Зеленоград): обосновываются выбор типа формирующих линий, разрядников, а так же других устройств передачи импульсов. Приводятся результаты испытаний разрядников за определенный промежуток времени на предмет временной стабильности и рабочего ресурса. Параметры генераторов приведены в Таблице 1, а фотографии одного из разрядников с плоскими электродами на рис. 1.

Таблица 1

Наименование параметров	Г-01 Пушка ЛУ	Г-08 п/инфл МН	Г-02 инфл МН	Г-03 дефл МН	Г-04 п/инфл БН	Г-05 Инфл БН
Энергия, МэВ	60	60-100	60-100	450	450	450
Диапазон амплитуд, кВ	40-45	6-10	6-12	40-60	40-60	40-60
Диапазон длительностей, нс	20	20	20	20	15-25	15-25
Джиттер, нс	2 - 3	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2
Фронт, нс	4-5	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3



Для соответствия техническим требованиям наносекундные генераторы имеют следующие общие свойства:

- Выходы генераторов имеют разнополярные импульсы,
- Применяются двойные формирующие линии, что значительно снижает требования к изоляции высоковольтного трансформатора, формирующих линий, разрядников и других элементов,
- Один источник питания через один высоковольтный трансформатор питает две формирующие линии, создающие импульсы обеих полярностей,
- Разрядники выполнены с неподвижными электродами,
- Во всех необходимых местах используется газовая изоляция вместо масляной, что резко упрощает эксплуатацию и удешевляет производство генераторов.



Рис. 1. Фотографии разрядника отрицательных импульсов.

Далее рассматривается методика оперативной настройки разрядников, анализируются особенности их запуска. На рис. 2 показаны импульсы с нагрузок одного из инфлекторов комплекса «ТНК» при оптимальной настройке рабочего режима.

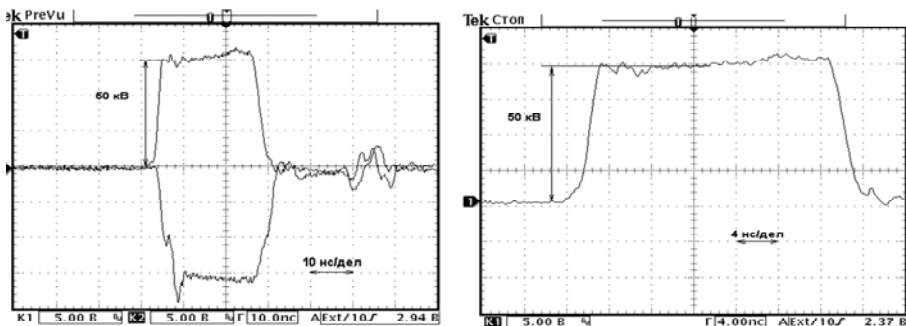


Рис. 2. Импульсы с нагрузок пластин инфлектора малого накопителя ТНК при оптимальной настройке.

На рис. 3 показана экспериментальная рабочая область разрядника отрицательных импульсов с цилиндрическими электродами с оптимальными рабочими зазорами 1,2 мм и 0,6 мм в широком диапазоне перестройки по зарядному напряжению от (35 – 63) кВ при изменении давления от (1.0 – 1.6) МПа. Из диаграммы видно, что с данной величиной зазоров разрядник может работать во всем диапазоне зарядных напряжений при подстройке давления. При одном фиксированном давлении достигается возможность оперативного изменения амплитуды выходных импульсов генератора на  $\pm 30\%$  от их номинального значения. При этом сохраняется стабильность со среднеквадратичным отклонением менее 1 нс при количестве самопробоев менее 1%.

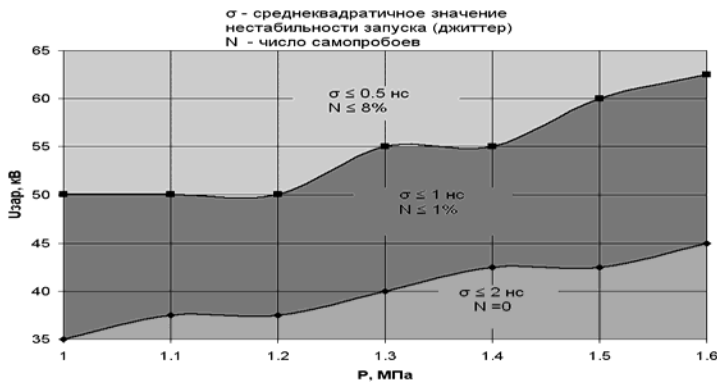


Рис. 3. Экспериментальная диаграмма перестройки разрядника.

На рис. 4 показаны результаты исследований джиттера разрядника инфлектора большого накопителя в течении рабочей смены.

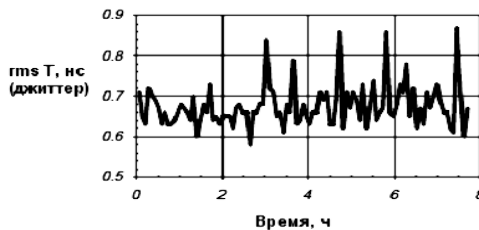


Рис. 4. Среднеквадратичное отклонение временного джиттера разрядника генератора инфлектора Большого накопителя.

**Третья глава** описывает разработку и создание новой системы быстрых кикеров и генераторов для лазера на свободных электронах (FEL) в университете Duke (США). Обосновывается выбор высоковольтных наносекундных коммутаторов для питания кикеров. В рамках данного проекта для увели-

чения тока в основном накопительном кольце FEL созданы наносекундные генераторы и кикеры как для бустера-синхротрона, так и для основного накопительного кольца. Была реализована инжекция из линейного ускорителя в бустер-синхротрон и побанчевый выпуск из синхротрона с пятикратной перестройкой по энергии (200 – 1.2 ГэВ) с применением современных псевдоискровых коммутаторов российского производства. Проведена оптимизация геометрии пластин кикеров бустера и основного накопительного кольца для уменьшения импеданса камеры в местах их расположения. На рис. 5 показана геометрия пластин одного из трех кикеров основного кольца.

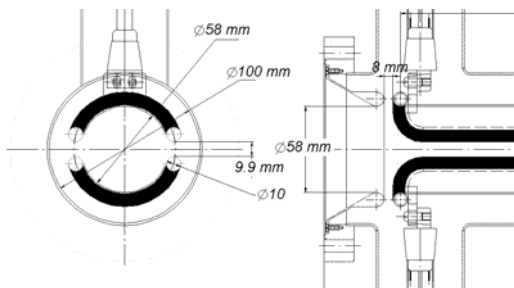


Рис. 5. Геометрия пластин одного из кикеров основного накопительного кольца FEL.

Далее рассматриваются особенности кикерных генераторов системы впуска-выпуска, приводятся результаты их работы за 2000 часов. На рис. 6 показаны импульсы с нагрузок пластин кикеров бустера.

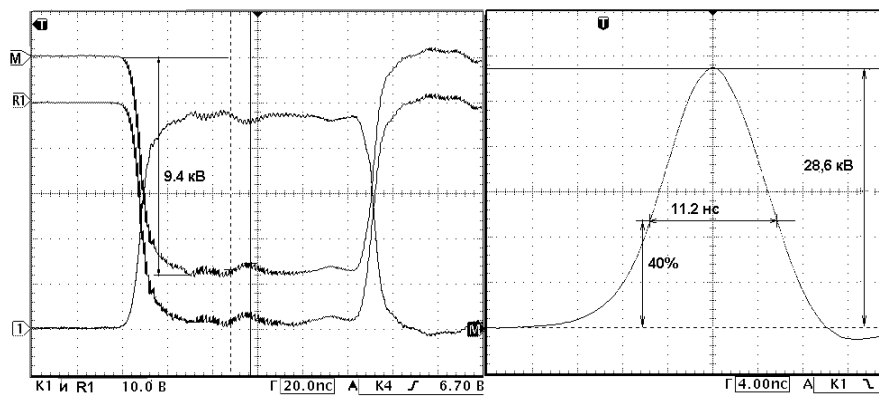


Рис. 6. Импульсы с нагрузок генераторов бустера: слева – импульс с инжекционного кикера, справа – кикер выпуска.

На рис. 7 показаны осциллограммы импульсов в приведенном масштабе на нагрузках кикеров инжекции и экстракции при перестройке по зарядному напряжению на формирующих линиях: Инжекция – 2 до 12 кВ с шагом 1 кВ, экстракция – от 5 до 25 кВ с шагом 2.5 кВ. Видно, что при перестройке по напряжению в широком диапазоне форма импульсов вполне приемлема.

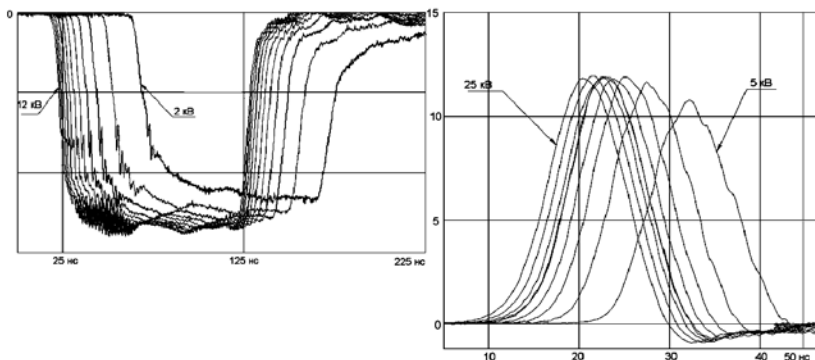


Рис. 7. Изменение формы импульсов при перестройке по напряжению.

Выбор коммутаторов типа ТПИ обеспечивает заданные требования к генераторам, а именно:

- ◆ джиттер — менее 1 нс (реально менее 200 пс);
- ◆ время нарастания и спада импульсов 4 — 5 нс;
- ◆ неравномерность «полочки» для импульса инжекции в бустер-синхротрон (100 нс) — не более 5%;
- ◆ имеется возможность пятикратной перестройки по выходному напряжению при сохранении формы импульсов.

Кроме этого:

- ◆ значительно упрощена конструкция за счет использования одного коммутатора с большим рабочим током (до 10 кА) для питания обеих пластин кикера;
- ◆ конструкция генераторов компактна и технологична при изготовлении и сборке.

Генераторы эксплуатировались в лаборатории FEL с 2005 года. С начала регулярной работы системы наработано не менее 2000 часов. За это время основные проблемы были с надежностью работы драйверов, которые к настоящему времени практически устранены. После 2000 часов стал наблюдаться рост падения напряжения в тиратроне на электроде предиионизации от протекающего постоянного тока. Для снижения этой тенденции, вместо по-

стоянной, вводится «квазипостоянная» предионизация, с подачей слаботоочного импульса поджига, предшествующего запуску тиратрона не более чем на 1 мс.

В четвертой главе детально рассмотрен проект быстрых магнитных кикеров и генераторов для специализированного комплекса СИ «Напоhana» (Япония). В рамках этого проекта были проведены исследования и разработка системы быстрых ферритовых кикеров со встроенной керамической вакуумной камерой и наносекундных генераторов для однооборотной инжекции электронного пучка из линейного ускорителя в бустер-синхротрон (БС), а так же выпуска и инжекции пучка в основное накопительное кольцо (ОНК). Такие кикеры позволяют соблюсти гладкость вакуумных камер ускорителей и малые импедансы связи с пучком. На рис. 8 показаны конструктивные особенности кикера инжекции бустера.

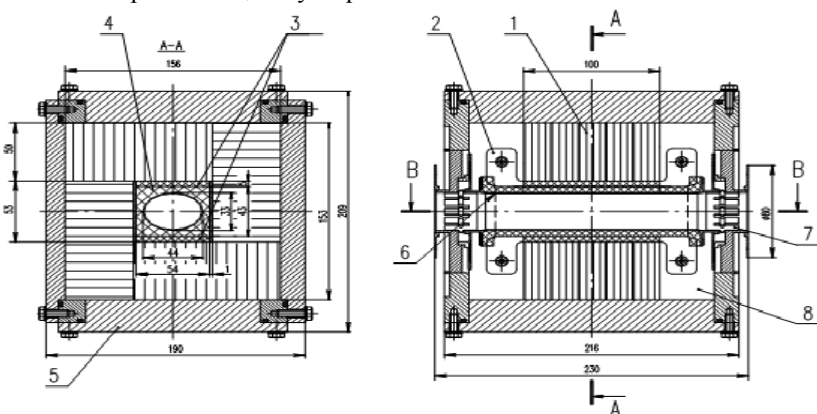


Рис. 8. Поперечное сечение кикера инжекции БС: 1 – ферритовые пластины, 2 – токопроводящие медные шины, 3 – диэлектрические пластины, 4 – керамическая вакуумная камера, 5 – несущие торцевые стенки, 6 – внутреннее металлизированное покрытие (Ti), 7 – высокочастотное контактное соединение, 8 – область заполнения для SF6.

В кикере инжекции бустера за счет вставки керамических пластин с  $\epsilon = 2000$  был реализован режим бегущей волны на согласованную нагрузку 25 Ом, что минимизирует хвосты после основного импульса.

В режиме выпуска электронов из бустера отсутствуют требования к импульсным хвостам, поэтому для кикера выпуска обмотка короткозамкнута. За счет этого ток в кикере и соответственно рабочее поле удваиваются. Аналогичную короткозамкнутую конструкцию имеют кикеры основного накопительного кольца, с разницей лишь в том, что для получения требуемого тока 2.6 кА шины кикера запитаны от генератора с малым выходным сопротивлением – 8.3 Ом. Поэтому на кикер подключаются параллельно шесть кабелей с волновым сопротивлением 50 Ом (рис. 9).

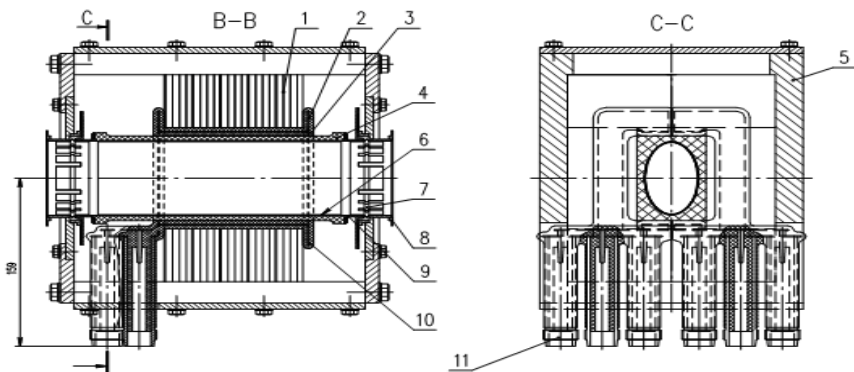


Рис. 9. Поперечное сечение кикерного магнита основного кольца с подключением транспортных генераторных кабелей: 9 – медный фланец, 10 - короткозамкнутая перемычка, 11 – входные кабельные контакты.

Для устранения хвостов генератор для кикера основного кольца выполнен по схеме с внутренней согласующей нагрузкой. В качестве быстрого коммутатора использован тиратрон ТГИ-1-1000/25. Для обеспечения проводимости тиратрона на время прохождения отражений от короткозамкнутого конца кикера сделана вспомогательная «греющая» кабельная линия, включенная в параллель с основной формирующей линией. На рис. 10 показана осциллограмма с внутренней согласующей нагрузки. Все питающие генераторы для кикера – тиратронные. Формирующие линии генераторов бустера – двухступенчатые на сосредоточенных параметрах. Для генератора основного кольца были разработаны кабельные формирующие линии на радиочастотном кабеле РК-50-9-12. Для обеспечения электрической прочности кабеля генераторов заполняются элегазом (SF<sub>6</sub>) под давлением до 0,5 МПа. Кикеры также имеют герметичную конструкцию и тоже заполняются элегазом.

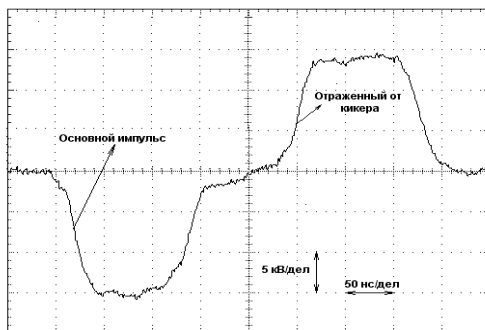


Рис. 10. Импульсы с внутренней согласующей нагрузкой прототипа одного из генераторов основного кольца.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы, выносимые на защиту.

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

1. *A. Kadnikov, Kurchatov Institute, 123182 Moscow, Russia, V. Deviatilov, V. Korchuganov, Yu. Matveev and D. Shvedov, Budker Institute of Nuclear Physics, High voltage nanosecond generators for SIBERIA-2, IEEE, 1996, Vol.2, p.1266-1268, WAA18, Bulletin of the American Physical Society - 1995, №3, Vol.40, p.1114.*
2. *О.В. Анчугов, Ю.Г. Матвеев, Д.А.Шведов, Институт Ядерной Физики СО РАН им. Г.И. Будкера, 630090, Новосибирск, Россия; В.Д. Бочков, Д.В. Бочков, В.М. Дягилев, В.Г. Ушич, ООО «Импульсные технологии», 390023 Рязань, Россия; С.Ф. Михайлов, В.Г. Попов, FEL Laboratory, Duke University, Durham, NC, USA. Результаты испытаний наносекундных генераторов на основе псевдоискровых коммутаторов типа "ТПИ" для комплекса FEL Университета Duke, США. Прикладная физика Т.1, 2010 год.*
3. *О.В. Анчугов, В.Е Блинов, А.В Богомяжков, А.Н. Журавлев С.Е Карнаев, Г.В Карпов, В.А Киселев, Г.Я Куркин, Е.Б Левичев, О.И Мешков, С.И Мишнев, Н.Ю Мучной, С.А Никитин, И.Б Николаев, В.В Петров, П.А Пиминов, Е.А Симонов, С.В Синяткин, В.В. Смалюк, А.Н Скринский, Ю.А Тихонов, Г.М Тумайкин, А.Г Шамоу, Д.Н Шатилов, Д.А Шведов, Е.И. Шубин. Эксперименты по физике пучков заряженных частиц на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М // ЖЭТФ т. 136, вып. 4 (2009) 690-702.*
4. *О.В. Анчугов, В.Е. Блинов, А.В. Богомяжков, А.А. Волков, А.Н. Журавлев, С.Е. Карнаев, В.А. Киселев, Е.Б. Левичев, О.И.Мешков, С.И. Мишнев, И.И. Морозов, Н.Ю.Мучной, С.А. Никитин, И.Б. Николаев, В.В. Петров, П.А. Пиминов, Е.А.Симонов, С.В. Синяткин, А.Н. Скринский, В.В. Смалюк, Ю.А.Тихонов, Г.М. Тумайкин, В.М. Цуканов, А.Г. Шамоу, Д.Н. Шатилов, Д.А. Шведов. Применение методов ускорительной физики в экспериментах по прецизионному измерению масс частиц на комплексе ВЭПП-4 с детектором Кедр. Приборы и техника эксперимента, 2010, № 1.*
5. *Ю.Г. Матвеев, Д.А. Шведов. Коаксиальные линии с ферритовым заполнением для обострения фронтов импульсов высоковольтных наносекундных генераторов. ПТЭ, №6, 2009 г., стр. 39-44.*
6. *K.N. Chernov, A.D. Chernyakin, S.A. Krutikhin, G.Ya. Kurkin, A.S. Medvedko, G.N. Ostreiko, V.M. Petrov, A.V. Philipchenko, I.K. Sedlyarov, G.V. Serdobintsev, S.V. Sinyatkin, A.G. Steshov, S.V. Tararyshkin, V.F. Veremeenko, V.A. Ushakov. D.A. Shvedov, V.D. Yudin, Budker INP, Novosi-*

- birsk, Russia; A.G. Valentinov, V.N. Korchuganov, Yu.V. Krylov, K.N. Kusnetsov, D.G. Odintsov, Yu.L. Yupinov, "Kurchatov Institute", Moscow, Russia; N.N. Grachev, V.P. Khramtsov, N.V Spinko, Federal State Institution "Lukin Research Institute of Physical Problems" Status of "Zelenograd" storage ring. XX International Workshop on Charged Particle Accelerators September 9-15, 2007, Problems of Atomic Sci. and Techn., Ser.: Nucl. Phys. Inv, 2008, №5, p.3-5.*
7. *M. Busch, S. Mikhailov, M. Emamian, J. Faircloth, S. Hartman, J. Li, V. Popov, G. Swift, V. Vylet, P. Wallace, P. Wang, Y. Wu, FEL Laboratory, Duke University, Durham, NC 27708, USA N. Gavrilov, G. Kurkin, Yu. Matveev, D. Shvedov, O. Anchugov, N. Vinokurov, Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russia. Status of the booster injector for the DUKE FEL Storage Ring, Proceedings of 2005 Particle Accelerator Conference, Knoxville, Tennessee, p.3544-3546.*
  8. *O.V Anchugov, Yu.G Matveev, D.A Shvedov, V.D Bochkov, D.V Bochkov, V.M Dyagilev, V.G Ushich, S.F Mikhailov, V.G Popov. Pulse generators with nanosecond leading edge duration based on tpi-type pseudospark switches for FEL complex. Proceeding of the 16th IEEE, Volume 2, Albuquerque, New Mexico, 17-22 June 2007, Page(s): 1335-1338, Digital Object Identifier 10.1109/PPPS.2007.4652434; Труды 20<sup>го</sup> Международного семинара по ускорителям в Алуште, 2007 год; Вопросы атомной науки и техники, серия: Ядерно-физические исследования 2008 год, №5, с.60-63.*
  9. *О.В. Анчугов, Ю.Г. Матвеев, Д.А. Шведов, В.Д. Бочков, Д.В. Бочков, В.М. Дягилев, В.Г. Ушич, ООО «Импульсные технологии», С.Ф. Михайлов, В.Г. Попов. Результаты испытаний наносекундных генераторов на основе псевдоискровых коммутаторов типа "ТПИ" для комплекса FEL Университета Duke, США. «Прикладная физика». №1, 2010.*
  10. *O.V. Anchugov, Yu.G Matveev., D.A Shvedov, System of high-voltage nanosecond generators for injection-extraction kickers for FEL complex of the Duke University Proceedings of RuPAC 2006, Novosibirsk, Russia, p.292-294.*
  11. *S.F. Mikhailov, M.D. Busch, M. Emamian, S.M. Hartman, Y. Kim, J. Li, V.G. Popov, G. Swift, P.W. Wallace, P. Wang, Y.K. Wu, N.G. Gavrilov, G. Ya. Kurkin, Yu. Matveev, O.V. Anchugov, D.A. Shvedov, N.A. Vinokurov, Commissioning of the booster injector synchrotron for the highs facility at Duke University, Proceedings of PAC07 Albuquerque, New Mexico, USA, p.1209-1211.*
  12. *В.Н. Корчуганов, Ю.Г. Матвеев, Д.А. Шведов, Высоковольтные наносекундные генераторы для питания кикеров ускорителей заряженных частиц, XVII Совещение по ускорителям заряженных частиц, ГИЦ РФ, Институт физики высоких энергий, Протвино, 17-20 октября 2000 г., Т.2, с. 19-23.*



ШВЕДОВ Дмитрий Александрович

**Быстрые системы впуска-выпуска  
для ускорителей заряженных частиц**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Сдано в набор .17.11. 2009 г.

Подписано в печать 17.11. 2009 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 0.8 печ.л., 0.7 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 33

---

Обработано на РС и отпечатано  
на ротапринтере «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,  
*Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11*