

*На правах рукописи*

*АНЧУГОВ Олег Викторович*

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ УСТРОЙСТВА  
ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПУЧКАМИ  
В УСКОРИТЕЛЯХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

01.04.20 - физика пучков заряженных частиц  
и ускорительная техника

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

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:

СУХИНА  
Борис Николаевич – доктор технических наук,  
Учреждение Российской академии наук  
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера  
Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск.

СЕРОВ  
Анатолий Федорович – доктор технических наук, профессор, Учреждение Российской академии наук  
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе  
Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск.

ВЕДУЩАЯ  
ОРГАНИЗАЦИЯ: – Учреждение Российской академии наук  
Институт сильноточной электроники  
Сибирского отделения РАН, г. Томск.

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

В современной технике циклических ускорителей заряженных частиц существенную роль играют импульсные устройства для быстрого управления пучками, так называемые "кикеры" (от англ. kickers). Их основное предназначение – сообщение пучку, с помощью электромагнитного поля, поперечного импульса необходимой амплитуды, в нужное время и в нужном направлении. Такое воздействие необходимо как для выпуска пучка из ускорителя путем искажения его орбиты и заведения, таким образом, в септум-магнит, так и впуска его в другой ускоритель.

Большее распространение получил метод однооборотной инжекции (или однооборотного выпуска), как наиболее эффективный и мало искажающий распределение частиц в пучке. Для его реализации кикеры должны удовлетворять ряду достаточно жестких условий. При инжекции, например, надо впустить сгусток так, чтобы через оборот в ускорителе снова не «ударить» его, или не задеть другие, выпускаемые или циркулирующие сгустки. Таким образом, импульс кикера должен иметь определенную длительность и не иметь отражений. При выпуске, особенно если выпускается один сгусток из нескольких, поле в кикере должно установиться к моменту подлета нужного пучка и уже отсутствовать при приближении следующего. Поэтому при небольшой длине орбиты ускорителя (или малом расстоянии между сгустками) длительность импульса, с учетом времени нарастания и спада, а также времени установления поля в кикере, должна быть менее периода оборота. При этом, в случае достаточно длинного сгустка (или цуга сгустков), для того, чтобы обеспечить максимальную эффективность перепуска и уменьшить потери частиц, фронты импульса должны быть минимальными. В этом случае, также закладываются достаточно жесткие требования к равномерности его плоской части, (т.н. "полочки"), поскольку этим определяется угол разброса частиц на выходе из кикера.

Эти проблемы становятся менее существенными при работе с коротким пучком, когда на кикер можно подавать импульс колоколообразной формы, при условии, что длительность его вершины является достаточной по сравнению с длиной пучка. Но во всех случаях существенным параметром является стабильность положения импульса по времени относительно пучка. Если медленные систематические отклонения, связанные, например, с изменением теплового режима или пульсациями питающего напряжения, можно скомпенсировать аппаратными средствами, изменяя задержку синхроимпульсов, то на разовые отклонения от импульса к импульсу относительно заданного значения (т.н. "джиттер") накладываются существенные ограничения, поскольку они приводят к уменьшению эффективной длительности, а также к возможности задеть соседний пучок.

Большинство современных накопителей, будь то источники СИ или коллайдер для физики высокой энергии, имеют достаточно большие периметры и работают с большим количеством ступок с целью повышения яркости источника СИ или светимости для коллайдеров. Поэтому даже при больших размерах ускорителей необходимые временные параметры импульсов находятся в наносекундном диапазоне. Соответственно, требуются генераторы, которые обеспечивали бы достаточно короткие, но мощные импульсы для управления пучками в этих условиях. Данная проблема решается разными способами. Для коротких импульсов, со временем нарастания порядка нескольких наносекунд, обычно используются искровые разрядники. В последнее время появились сообщения о применении твердотельных коммутаторов, обеспечивающих аналогичные параметры, т.н. FID-устройства, но они пока не получили большого распространения. Более длинные импульсы, порядка десятков и сотен наносекунд, обеспечиваются устройствами, собранными на основе газоразрядных приборов, как правило – тиратронов.

В ИЯФ им. Г.И.Будкера СО РАН накоплен большой опыт по разработке и эксплуатации подобных устройств. Данная работа, выполненная в ИЯФ, посвящена в основном описанию генераторов с использованием тиратронов, как уже достаточно давно разработанных – типа ТГИ1-1000/25, так и новых – псевдоискровых коммутаторов марки ТПИ разных типов, впервые использованных в такой области.

Актуальность представленной в диссертации работы обусловлена необходимостью изготовления данных генераторов для нужд комплекса ВЭПП-4М и востребованностью новых устройств с более высокими параметрами для комплекса FEL Университета Duke, США.

### **Цель работы**

- Моделирование, разработка и изготовление генераторов для питания отклоняющих пластин кикеров в ускорителях заряженных частиц.
- Изучение функционирования псевдоискровых коммутаторов и создание драйвера для их запуска.
- Разработка системы быстрого сведения-разведения пучков в ВЭПП-4М.

### **Научная новизна**

Был сконструирован и изготовлен ряд разнообразных импульсных высоковольтных генераторов для питания отклоняющих пластин кикеров, на которых были получены уникальные результаты. Разработана оригинальная конструкция компактной формирующей линии. Сконструирован драйвер для запуска псевдоискровых коммутаторов, с помощью которого удалось получить уникальное для газоразрядных приборов время нарастания анодного

тока. Была разработана методика настройки оптимальных параметров запускающих импульсов для псевдоискровых коммутаторов. Представлены способы и методы повышения надежности высоковольтных импульсных генераторов. Создана система быстрого сведения и разведения пучков в ускорителе ВЭПП-4М, которая позволила значительно снизить потери частиц при переходе в режим эксперимента.

Впервые в ускорительной технике были применены отечественные псевдоискровые коммутаторы. На их основе созданы импульсные генераторы с уникальными для газоразрядных приборов параметрами.

### **Практическая значимость работы**

Используемые методы расчета и проектирования генераторов применимы при создании аналогичных устройств как для ускорителей заряженных частиц, так и в других областях, где востребовано использование тиратронов, например в лазерной технике.

Отработана методика применения псевдоискровых коммутаторов в ускорительной технике, что открывает широкие перспективы для их дальнейшего применения в данной области.

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

1. Был разработан и изготовлен генератор для питания отклоняющих пластин инфлекторов ВЭПП-4М. Разработана оригинальная конструкция компактной формирующей линии.
2. Спроектирован и изготовлен генератор "удара" ВЭПП-4М. С его помощью, несмотря на большую неоднородность нагрузки, был получен импульс тока хорошей прямоугольной формы.
3. Был собран и испытан прототип, а затем разработан и запущен в производство драйвер для запуска псевдоискровых коммутаторов, с помощью которого удалось получить уникальное для газоразрядных приборов время нарастания анодного тока – порядка 4 нс. Была разработана методика настройки оптимальных параметров запускающих импульсов.
4. Сконструированы, собраны и сданы в эксплуатацию на комплексе FEL Университета Duke, Северная Каролина, США три разных конструкции генераторов, в которых впервые в оборудовании для ускорителей были применены отечественные псевдоискровые коммутаторы типа ТПИ. На этих устройствах были получены уникальные параметры импульсов. При использовании новой системы перепуска существенно выросла эффективность работы всего комплекса, во многом благодаря возможности перепускать пучок в широком диапазоне энергий от 0.18 до 1.2 ГэВ.
5. Изложены способы и методы повышения надежности высоковольтных импульсных генераторов, выработанные автором в процессе многолетней работы с такими устройствами.

6. Разработана, испытана и успешно применяется система быстрого сведения и разведения пучков в ускорителе ВЭПП-4М, которая позволила значительно снизить потери частиц при переходе в режим эксперимента.

### **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: RuPAC 2006, Novosibirsk, Russia; International synchrotron radiation conference SR 2008, Novosibirsk, Russia; 2007 Pulsed Power and Plasma Science Conference, Albuquerque, New Mexico; 2005 Particle Accelerator Conference, Knoxville, Tennessee; PAC 2009, Vancouver, Canada и др., а также содержатся в статьях в 4 реферируемых научных журналах. Основные результаты работы представлены в 16 публикациях.

### **Структура работы**

Диссертация состоит из введения, девяти глав, заключения и списка литературы, из 40 наименований, изложена на 121 странице машинописного текста, содержит 93 рисунка и 1 таблицу.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во Введении** рассмотрены основные принципы использования кикеров, описаны условия их применения в различных условиях. Обоснованы требования к питающим их генераторам. Сформулированы основные цели диссертации и приведено краткое изложение содержания работы.

**Первая глава** посвящена описанию установки "Впуск-выпуск", которая функционирует более 20 лет в составе установки "Позитрон", в свою очередь являющейся составной частью комплекса ВЭПП-4М. Описывается принцип действия генератора на основе трехэлектродного искрового разрядника, приводятся упрощенные чертежи нагрузок с описанием принципа их работы. Разъясняются конструкции вспомогательных элементов: инверторов, коммутаторов. Отмечены доработки отдельных элементов, которые способствовали улучшению качества перепуска пучков.

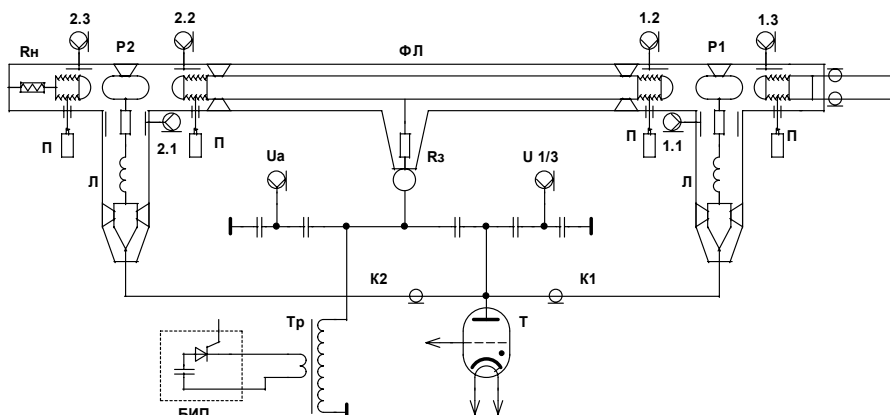


Рис. 1.1. Схема генератора.

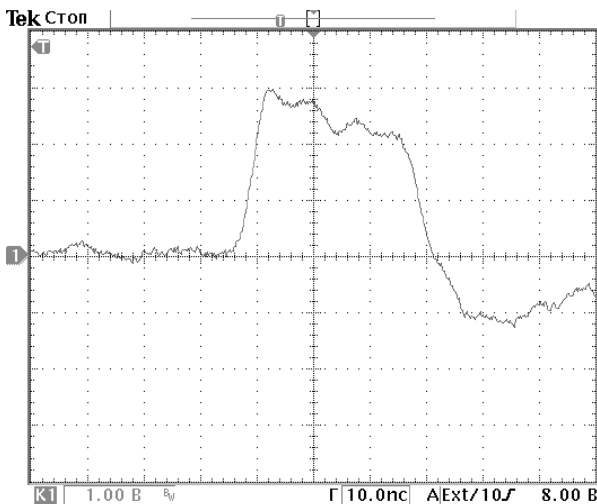


Рис. 1.3. Импульс на выходе генератора.

**Вторая глава** посвящена генератору для питания отклоняющих пластин инфлекторов ВЭПП-4М. В ней рассмотрено его назначение, объясняется методика расчета основных параметров тиратронного генератора и формирующей линии на дискретных элементах и описана ее конструкция. Приведены результаты компьютерного моделирования, описана конструкция генератора и принцип его работы, уделено внимание конструкции разделки и соединительного устройства для кабелей, изложены полученные результаты.

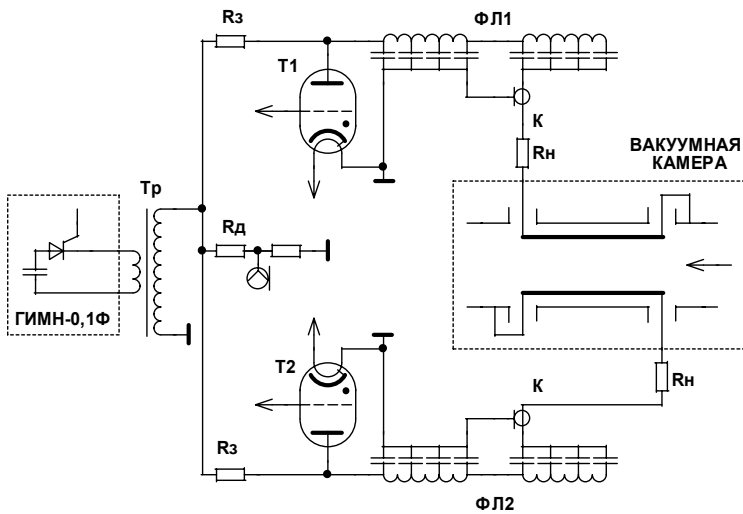


Рис. 2.1. Схема генератора.

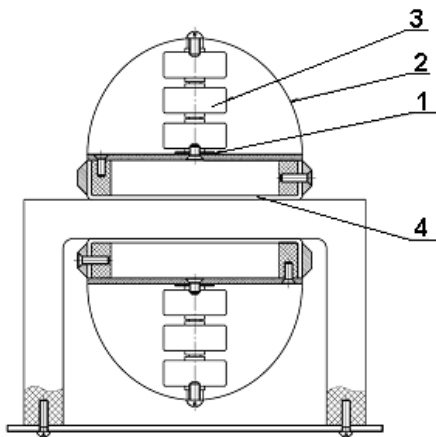


Рис. 2.2. Поперечный разрез формирующей линии.

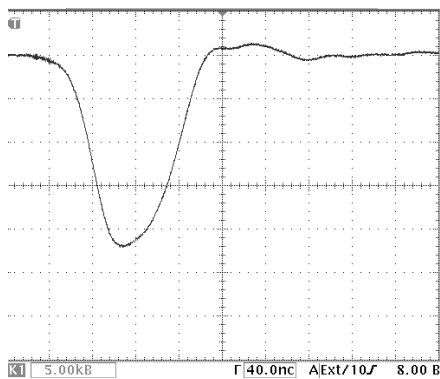


Рис. 2.3. Импульс на выходе генератора.



**В третьей главе** описывается генератор импульсного "удара" по пучку ВЭПП-4М. В ней обосновываются специфические требования к данному устройству, приведен расчет генератора с компьютерным моделированием результатов, описана его конструкция с приведением структурной схемы, в качестве результата приведена осциллограмма полученного импульса.

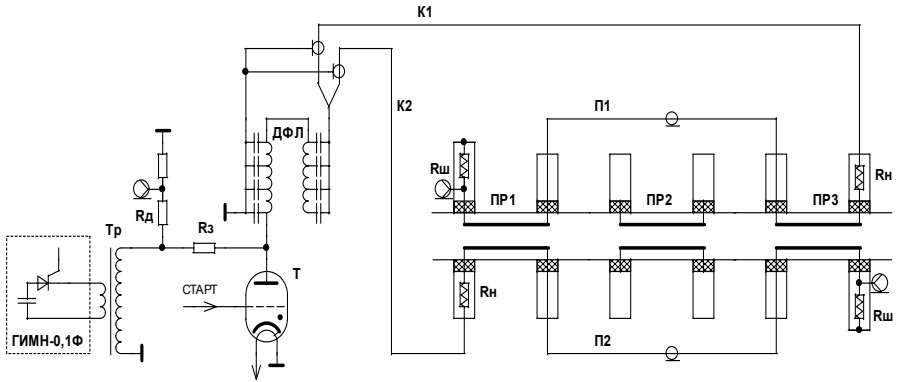


Рис. 3.1. Схема генератора.

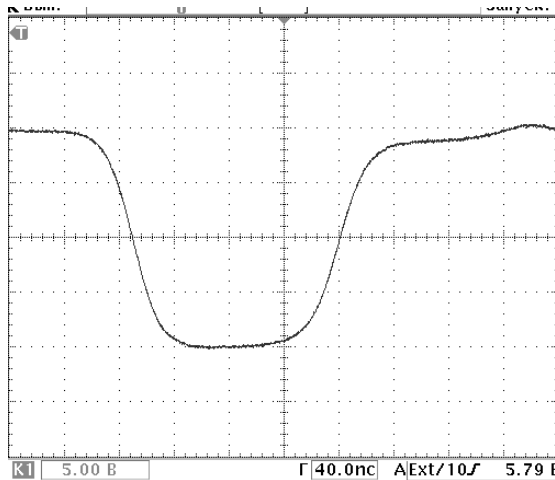


Рис. 3.2. Импульс на контрольном шунте.

**Четвертая глава** посвящена описанию устройства для запуска псевдоискровых коммутаторов – драйверу. Кратко изложены особенности работы этих коммутаторов и необходимость специфического запуска. Обосновывается необходимость данной разработки в сравнении с изделием, предложенным предприятием-разработчиком. Приведены блок-схема и принципиальные схемы основных элементов устройства. Описаны полученные результаты, и проиллюстрирован метод управления псевдоискровыми коммутаторами.

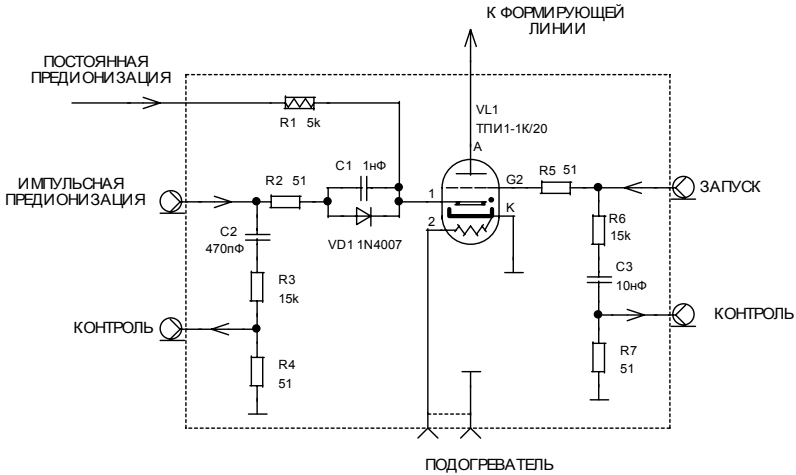


Рис. 4.1. Принципиальная схема управления ТПИИ-тиратронами.

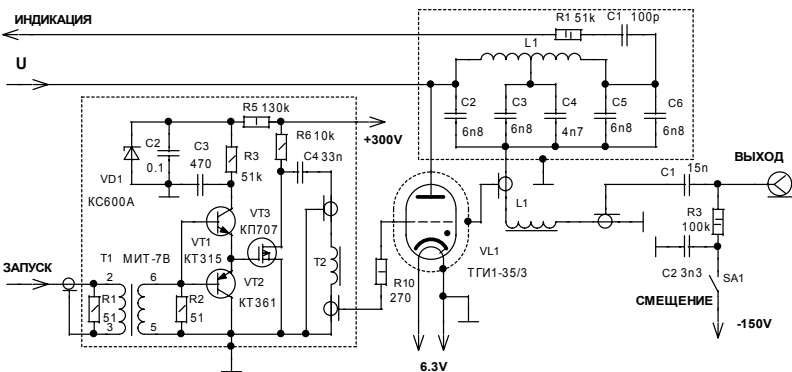


Рис. 4.2. Принципиальная схема генератора импульсов.

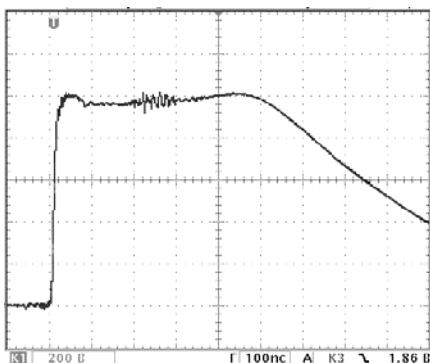


Рис. 4.3. Форма импульса на выходе драйвера.

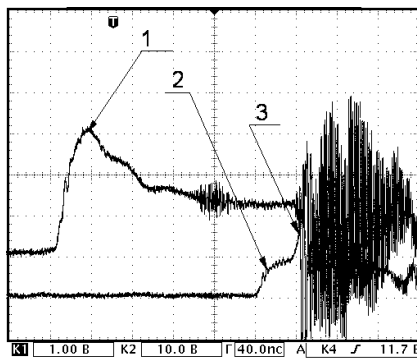


Рис. 4.4. Осциллограммы с контрольных точек (см. рис. 4.1):  
1 – импульс предионизации;  
2 – импульс запуска;  
3 – момент открывания тиратрона.

Последующие три главы посвящены генераторам, разработанным для комплекса FEL университета Duke, США, Северная Каролина.

**В пятой главе** описывается генератор инжекции в бустер. В ней рассмотрено его назначение, описывается метод компенсации рассогласования, вносимого внутренним сопротивлением коммутатора, подробно описана конструкция с приведением блок-схемы и чертежей некоторых элементов, подробно описана конструкция согласующей нагрузки. Результаты проиллюстрированы осциллограммами.

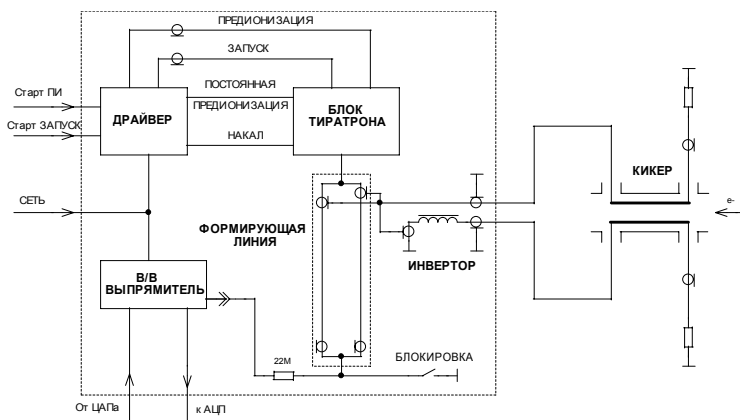


Рис. 5.1. Блок-схема генератора.

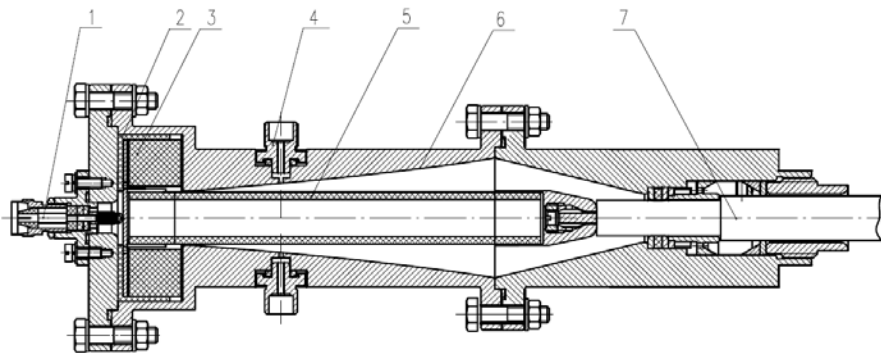


Рис. 5.1 . Чертеж согласующей нагрузки с объемными резисторами.

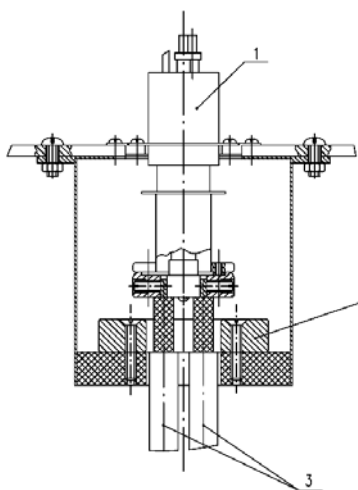


Рис.5.2. Конструкция тиратронного узла:  
 1 – тиратрон; 2 – прижимная шайба, посредством которой обеспечивается соединение оплеток кабелей формирующей линии и выходных кабелей (на чертеже не показаны);  
 3 – кабели формирующей линии.

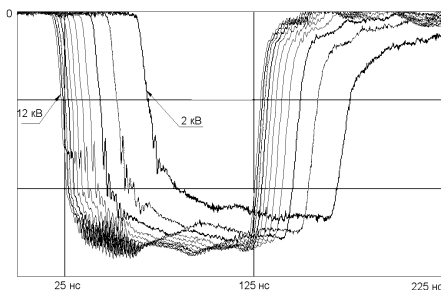


Рис. 5.3. Приведенные по амплитуде формы импульсов на согласующей нагрузке при изменении зарядного напряжения от 2 до 12 кВ с шагом 1 кВ.

**Шестая глава** содержит описание генератора экстракции из вышеупомянутого бустера. В ней обосновывается необходимость применения псевдоисковых коммутаторов в данной конструкции, приведена блок-схема, конструкция проиллюстрирована фотографией внутреннего вида шкафа генератора. Результаты представлены в виде приведенных к одному масштабу осциллограмм, снятых при разных зарядных напряжениях.

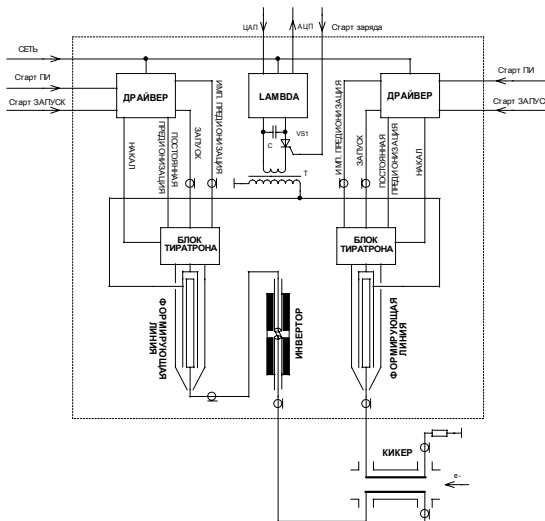


Рис.6.1. Блок-схема генератора выпуска FEL Duke.

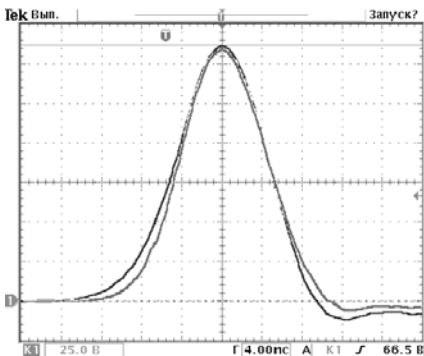


Рис. 6.2. Сигнал с согласующих нагрузок пластин кикера.

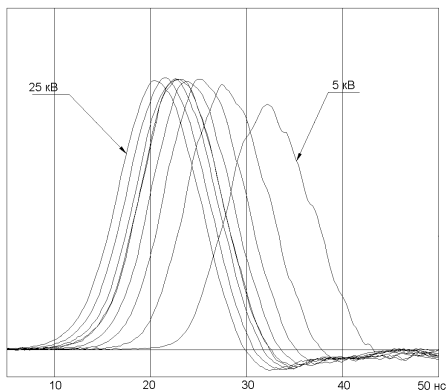


Рис.6.3. Осциллограммы импульсов в приведенном масштабе на нагрузке кикера.

Седьмая глава посвящена генератору, предназначенному для питания отклоняющих пластин впускной системы основного кольца. Расчеты проиллюстрированы компьютерным моделированием, описаны особенности его конструкции. С помощью блок-схемы объясняется принцип работы. В результатах показаны осциллограммы с контрольных делителей согласующих нагрузок отклоняющих пластин кикеров.

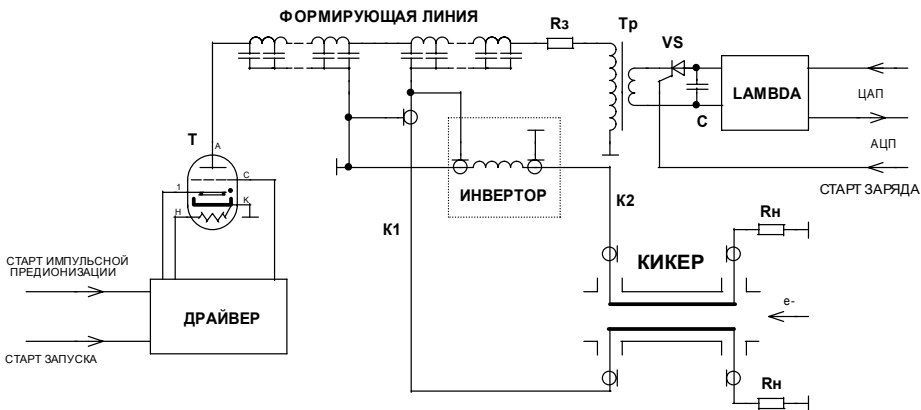


Рис. 7.1. Блок-схема генератора инъекции в основное кольцо комплекса FEL.

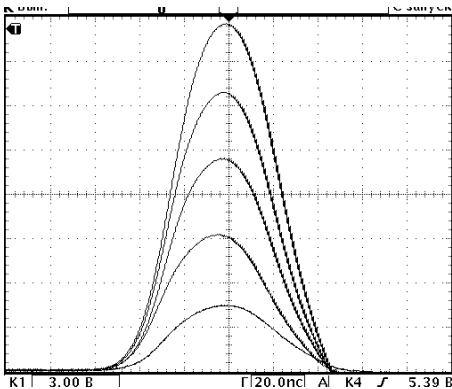


Рис. 7.2. Форма импульса при изменении зарядного напряжения в диапазоне от 5 до 15 кВ с шагом 5 кВ.

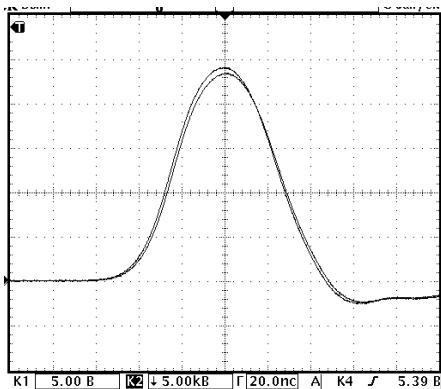


Рис. 7.3. Форма импульса на согласующей нагрузке кикера с наложением сигналов с двух пластин.

**В восьмой главе** содержится описание системы быстрого сведения и разведения встречных пучков в ускорителе ВЭПП-4М. Обосновывается необходимость данной операции, приводятся результаты компьютерного моделирования. С помощью блок-схемы объясняется принцип работы. Результаты проиллюстрированы осциллограммами, снятыми непосредственно на пластинах разведения.

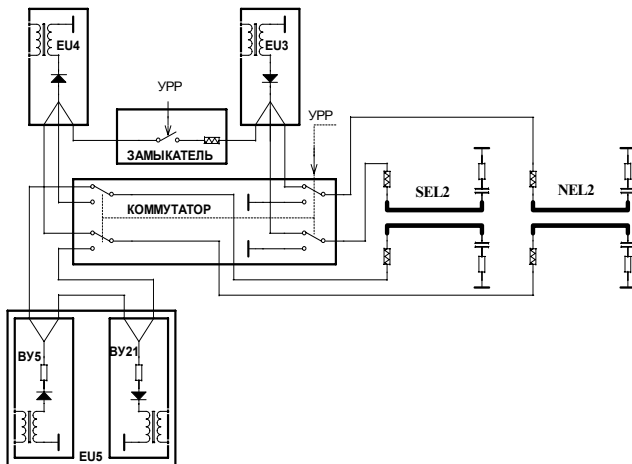


Рис. 8.1. Схема быстрого управления пучками.

В девятой главе изложены возможные методы повышения надежности работы высоковольтных наносекундных генераторов, основанные на многолетнем опыте работы автора с такими устройствами. Отдельно рассматривается повышение надежности работы различных элементов генераторов, как искровых разрядников, коаксиальных формирующих линий, так и соединительных элементов в выходных цепях. Также уделено внимание повышению надежности работы тиратронных генераторов.

**В Заключение** перечислены основные результаты работы, которые одновременно являются положениями, выносимыми на защиту.

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

1. *О.В. Анчугов, Ю.Г. Матвеев, Д.А. Шведов, В.Д. Бочков, Д.В. Бочков, В.М. Дягилев, В.Г. Ушич, 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.*

2. *Popov V., Mikhailov S., Wallace P., Anchugov O., Matveev Yu., Shvedov D.* Cold cathode thyatron based high-voltage kicker system for the Duke accelerators: performance and improvements. Proceeding PAC 2009. TU6RFP080.
3. *О.В. Анчугов, В.Е Блинов, А.В Богомяков, А.Н, Журавлев С.Е Карнаев, Г.В Карпов, В.А Киселев, Г.Я Куркин, Е.Б Левичев, О.И Меишков, С.И Мишнев, Н.Ю Мучной, С.А Никитин, И.Б Николаев, В.В Петров, П.А Пуминов, Е.А Симонов, С.В Сияткин, В.В. Смалюк, А.Н Скринский, Ю.А Тихонов, Г.М Тумайкин, А.Г Шапов, 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. *Anchugov O.V., Matveev Yu.G., Shvedov D.A., Bochkov V.D., Bochkov D.V., Dyagilev V.M., Ushin V.G., Mikhailov S.F., Popov V.G.* Pulse generators with nanosecond leading edge duration based on TPI-type pseudospark switches for FEL complex. Вопросы атомной науки и техники. Серия: ядерно-физические исследования. – 2008. № 5. – С. 60-63.
5. *Anchugov O.V., Matveev Yu.G., Shvedov D.A.* 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.
6. *Popov V., Mikhailov S., Wallace P., Anchugov O., Matveev Yu., Shvedov D.* Cold cathode thyatron based high-voltage kicker system for the Duke accelerators: performance and improvements. Proceeding PAC 2009. TU6RFP080.
7. *Mikhailov S.F., Busch M.D., Emamian M., Hartman S.M., Kim Y., Li J., Popov V.G., Swift G., Wallace P.W., Wang P., Wu Y.K., Howell C.R., Gavrilow N.G., Kurkin G.Ya., Matveev Yu., Anchugov O.V., D.A., Shvedov, Vinokurov N.A.* Commissioning of the booster injector synchrotron for the higs facility at Duke University. Proceedings of PACO7, Albuquerque, New Mexico, USA. P. 1209-1211.
8. *Anchugov O.V., Matveev Yu.G., Shvedov D.A., Bochkov V.D., Bochkov D.V., Dyagilev V.M., Ushin V.G., Mikhailov S.F., Popov V.G.* Pulse generators with nanosecond leading edge duration based on TPI-type pseudospark switches for FEL complex. 2007 IEEE Pulsed Power and Plasma Science Conference, Albuquerque, New Mexico. Publication Date: 17-22 June 2007. Volume: 2, pages 1335-1338
9. *Anchugov O., Mikhailov S.F., Li J., Popov V., Wallace P., Wang P., Wu Y.K.* Multibunch Injection Scheme for the Booster Synchrotron of the Duke FEL and HIGS Facility. Proceeding PAC 2009. TU5RFP066.



АНЧУГОВ Олег Викторович

**Высоковольтные устройства  
для управления пучками  
в ускорителях 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 № 32

---

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

