

**B 381.1  
C.56**

# **XVII**

## **СОВЕЩАНИЕ ПО УСКОРИТЕЛЯМ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ**

---

**ТОМ 2**

---

**ПРОТВИНО  
2000**

B.381.1  
C.56

Российская Академия наук  
Министерство промышленности, науки и технологий  
Российской Федерации  
Министерство Российской Федерации по атомной энергии  
Объединенный институт ядерных исследований  
ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий

# XVII СОВЕЩАНИЕ ПО УСКОРИТЕЛЯМ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

*ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий  
Протвино, 17-20 октября 2000 года*

**Сборник докладов  
в 2-х томах**

**Том 2**

**Протвино 2000**

# 300 кВ/ 15 кВт прецизионный источник питания инжектора электронов

Р.В. Воскобойников, В.В. Колмогоров, А.С. Медведко, М.А. Щеглов

Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия

Существенный прогресс в области создания полупроводниковых элементов позволяет при относительно малых трудозатратах проектировать компактные и экономичные источники высоковольтного питания, имеющие высокую стабильность выходного напряжения. В статье описывается разработанный, изготовленный и введенный в эксплуатацию источник высоковольтного питания электронной трубки инжектора микротрона-рекуператора, создаваемого в БИЯФ СО РАН. Источник имеет регулируемое выходное напряжение от -30 кВ до -300 кВ и выходную мощность до 15 кВт. Достигнута долговременная стабильность выходного напряжения и уровень пульсаций в режиме номинальной мощности не более  $\pm 0.1\%$ .

## 1. Функциональная схема источника питания электронных трубок

На рис.1 показана функциональная схема источника питания электронных трубок (ИПЭТ). Основными элементами ИПЭТ являются: 1 – высоковольтная часть, 2 – генератор переменного напряжения частотой 500 Гц, 3 – система управления и контроля высоковольтного выпрямителя, 4 – дополнительный выпрямитель последовательного стабилизатора, 5 – генератор переменного напряжения частотой 40 кГц, 6 – система управления и контроля стабилизатора, 7 и 8 – входные выпрямители. Отличительной особенностью данного источника питания является наличие дополнительного последовательного стабилизатора, предназначенного для уменьшения пульсаций выходного напряжения.

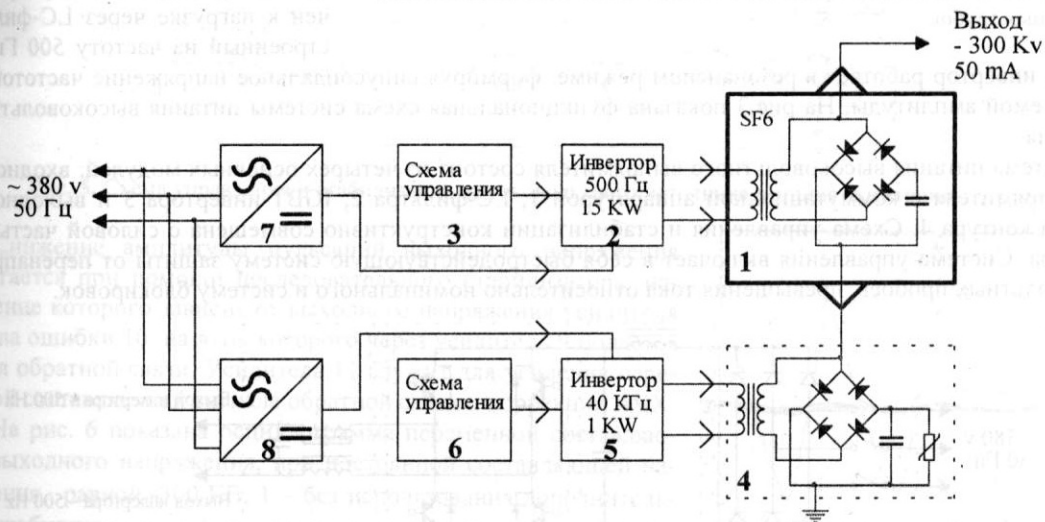


Рис. 1. Функциональная схема источника питания электронных трубок.

## 2. Высоковольтная часть источника питания электронных трубок

На рис.2 показана функциональная схема высоковольтной части ИПЭТ.

Высоковольтная часть источника представляет собой секционированный трансформатор - выпрямитель и состоит из тринадцати последовательно соединённых выпрямительных секций. Каждая секция включает в себя вторичную обмотку высоковольтного трансформатора и диодный выпрямитель с емкостным фильтром. Диодный выпрямитель собран по схеме с удвоением напряжения из лавинных диодов, а емкостной фильтр – из керамических высоковольтных конденсаторов. Первичная обмотка трансформатора и выпрямительные секции помещены в сосуд с изолирующим газом SF<sub>6</sub>, имеющим избыточное давление 0.7 Атм.

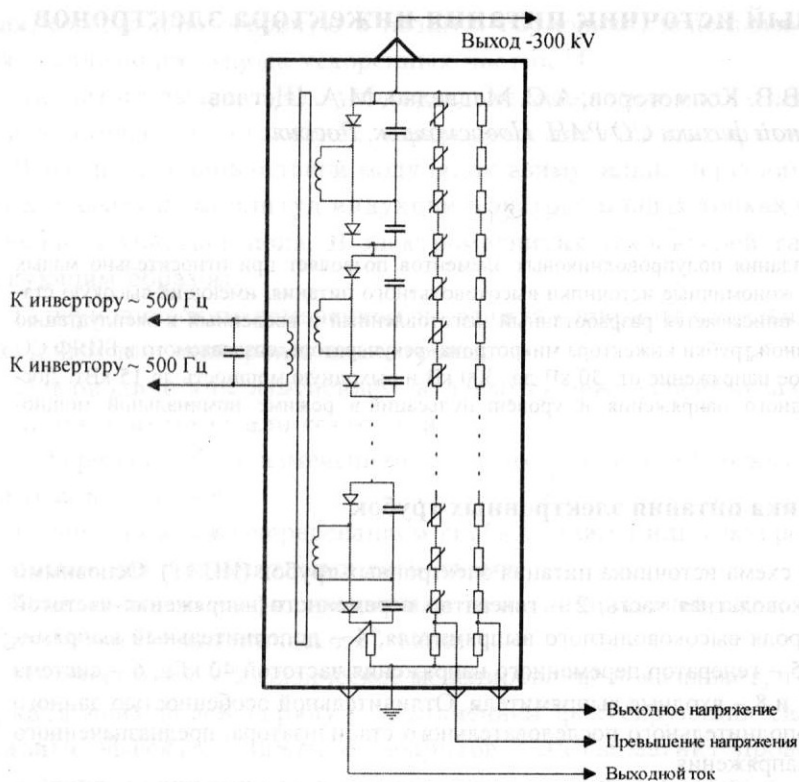


Рис. 2. Функциональная схема высоковольтной части источника питания электронных трубок.

образом, инвертор работает в резонансном режиме, формируя синусоидальное напряжение частотой 500 Гц регулируемой амплитуды. На рис.3 показана функциональная схема системы питания высоковольтного выпрямителя.

Система питания высоковольтного выпрямителя состоит из четырех основных модулей: входного диодного выпрямителя с коммутационной аппаратурой 1, LC-фильтра 2, IGBT-инвертора 3 и выходного резонансного контура 4. Схема управления и стабилизации конструктивно совмещена с силовой частью IGBT-инвертора. Система управления включает в себя быстродействующую систему защиты от перенапряжений, высоковольтных пробоев, превышения тока относительно номинального и систему блокировок.

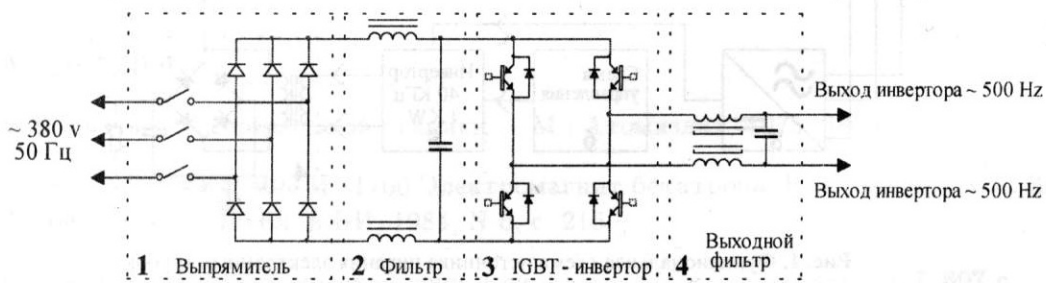


Рис. 3. Функциональная схема системы питания высоковольтного выпрямителя.

#### 4. Дополнительный последовательный стабилизатор выходного напряжения

Функциональная схема дополнительного стабилизатора выходного напряжения идентична схеме основного источника высоковольтного питания, существенным отличием являются значительно меньшая выходная мощность (меньше 1 кВт) и сравнительно высокая частота преобразования – 40 кГц. Для достижения уровня пульсаций ниже 0.1% достаточен петлевой коэффициент усиления менее 40 дБ. Амплитуда выходного напряжения дополнительного стабилизатора напряжения достигает 15 кВ при подавлении основной гармоники (1кГц) выпрямленного напряжения высоковольтного источника.

Следует отметить, что такие выпрямительные секции выпускаются в БИЯФ в большом количестве как составная часть высоковольтных ускорителей серии ЭЛВ для технологических нужд. Рабочая частота выбрана относительно низкой – 500 Гц, значит, частота пульсации выпрямленного напряжения равна 1 кГц.

### 3. Генератор переменного напряжения частотой 500 Гц

Генератор переменного напряжения служит для формирования переменного синусоидального напряжения заданной амплитуды и построен на основе SWITCH-MODE технологии.

Силовым элементом является IGBT-инвертор мостового типа с широтно-импульсным (PWM) управлением. Питание инвертора осуществляется от трехфазного диодного выпрямителя с LC-фильтром. Инвертор подключен к нагрузке через LC-фильтр, настроенный на частоту 500 Гц. Таким

На рис. 4 показана функциональная схема последовательного стабилизатора напряжения.

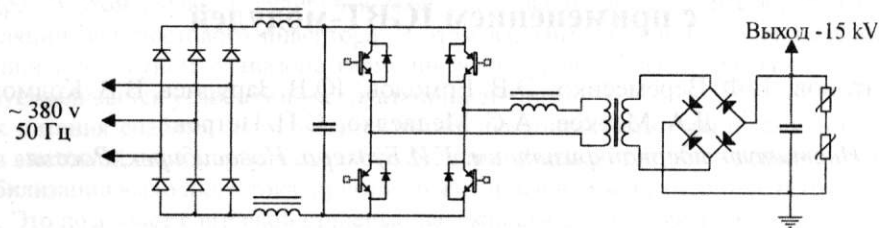


Рис. 4. Функциональная схема последовательного стабилизатора.

Последовательный стабилизатор напряжения является независимым устройством и присоединяется к высоковольтному источнику питания посредством коаксиального кабеля.

## 5. Система управления и стабилизации высоковольтного источника

На рис. 5 показан принцип совместной работы высоковольтного выпрямителя и последовательного стабилизатора. Стабилизация постоянной составляющей выходного напряжения осуществляется при помощи изменения скважности инвертора, питающего высоковольтный выпрямитель. Скважность определяется выходным напряжением усилителя сигнала ошибки 9, на неинвертирующий вход которого подаётся сигнал от управляющего ЦАП, а на инвертирующий – сигнал обратной связи.

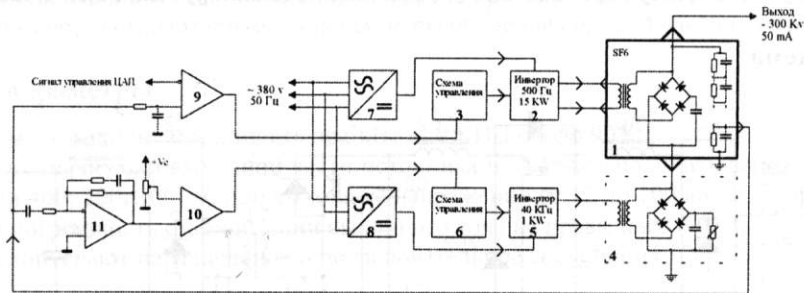


Рис. 5. Схема управления и стабилизации высоковольтного источника питания электронных трубок.

Снижение амплитуды пульсаций выходного напряжения достигается при помощи последовательного стабилизатора, напряжение которого зависит от выходного напряжения усилителя сигнала ошибки 10, на вход которого через усилитель 9 подаётся сигнал обратной связи. Усилитель 11 служит для усиления переменной составляющей сигнала обратной связи и коррекции АЧХ.

На рис. 6 показана осциллограмма переменной составляющей выходного напряжения, при постоянной составляющей напряжения, равной -300 КВ, 1 – без использования дополнительного стабилизатора, и 2 – с использованием последовательного стабилизатора.

Как видно из приведённой осциллограммы, использование последовательного стабилизатора позволяет уменьшить амплитуду пульсаций выходного напряжения более чем в 10 раз.

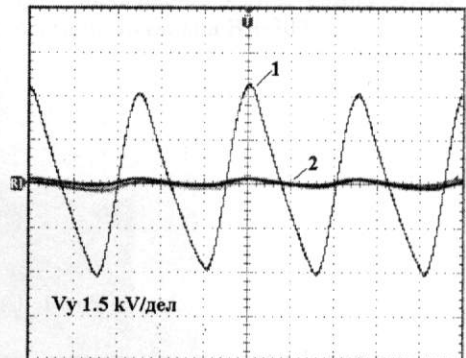


Рис. 6. Осциллограмма переменной составляющей напряжения.

## Литература

- [1] V. Kolmogorov, A. Bulatov, Yu. Evtushenko, A. Medvedko. "High-voltage modulator with small energy accumulation". - EPAC 2000, p. 2208.
- [2] D. Poole, L. Ford, Griffiths, M. Heron, C. Horrabin. - "A Crowbarless High Voltage Power Converter For RF Klystrons". EPAC 1997, p. 2326.

# Разработка прецизионного источника питания электромагнитов с применением IGBT-модулей

В.В. Антонов, В.Ф. Веремеенко, Э.В. Ермолов, Ю.В. Заруднев, В.В. Колмогоров,  
Д.А. Марков, А.С. Медведко, С.П. Петров  
Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера, Новосибирск, Россия

## 1. Актуальность разработки

В институте ядерной физики СО РАН накоплен многолетний опыт разработки и изготовления прецизионных источников питания электромагнитов ускорительно-накопительных комплексов. Для питания корректирующих элементов, линз и основных поворотных магнитов ускорителей требуются источники в широком диапазоне выходных мощностей – от нескольких ватт до нескольких мегаватт с выходным током от 1 до 10000 А. Требуемая точность поддержания уровня тока лежит в диапазоне от 1 до 0.001%. Появление новых силовых электронных элементов, таких как IGBT-транзисторов, полевых транзисторов, быстродействующих выпрямительных диодов, стимулировало разработку силовых источников нового поколения.

В частности, разработан специализированный источник электромагнитов ускорительно-накопительных комплексов с использованием IGBT-модулей в качестве основных силовых элементов. Источник ВЧ-300 выполнен по современной технологии высокочастотного преобразования мощности с применением широтно-импульсной модуляции сигнала (Switch Mode Technology with Pulse-Width Modulation).

## 2. Структурная схема

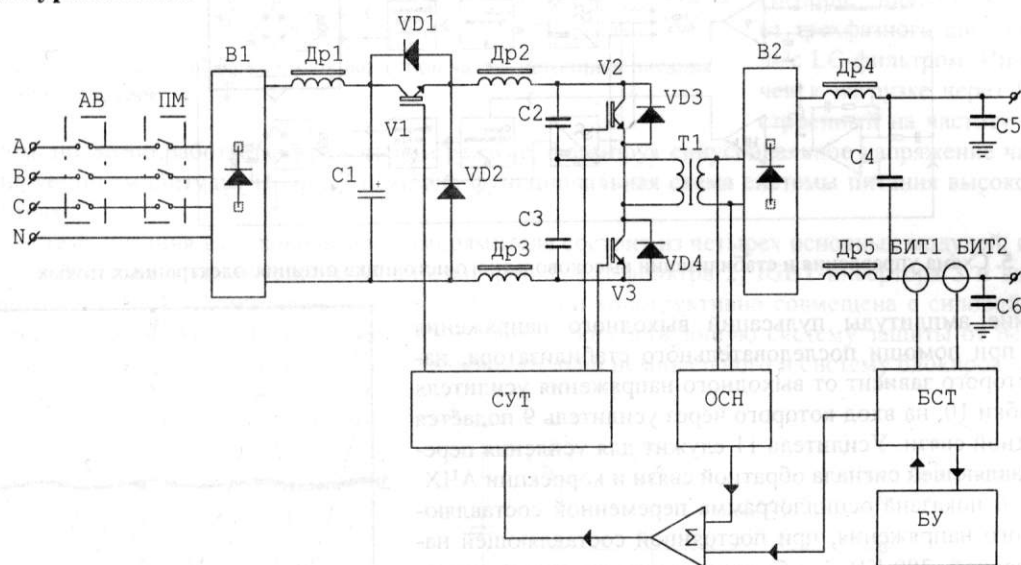


Рис. 1. Структурная схема источника ВЧ-300.

На рис. 1 показана структурная схема источника ВЧ-300. Источник питается от трехфазной сети 380/220 через встроенный автоматический выключатель и магнитный пускатель с набором необходимых защит и блокировок. Силовая часть источника включает: диодный выпрямитель В1, входной LC-фильтр, образованный Др1, С1, высокочастотный прерыватель (Chopper) V1 с частотой коммутации 40 кГц, сглаживающий фильтр Др2, Др3, С2, С4, полумостовой инвертор на IGBT-транзисторах V2, V3 с выходной частотой 20 кГц, согласующий трансформатор Т1, низковольтный выпрямитель В2, выходной фильтр Др4 Др5 С4 С5 С6.

Использование в источнике двойного преобразования (последовательный прерыватель на V1 ( $f = 40$  кГц) и полумостовой инвертор на V2, V3 и С2, С3) позволяет “разгрузить” сильноточный фильтр основной частоты преобразования 20 кГц разбиением его на две части, одна из которых расположена после прерывателя Т1.

Разработан также вариант силовой схемы источника без высокочастотного прерывателя (Chopper) и дросселей Др2, Др3. В этом случае регулировка выходного напряжения осуществляется путем широтно-импульсной модуляции полумостового инвертора. В этом варианте источник имеет повышенный уровень выходных пульсаций в частотном диапазоне гармоник частоты преобразования. Использование того или иного варианта обуславливается условиями эксплуатации источника.

Источник питания снабжен двумя идентичными бесконтактными датчиками тока (БИТ1, БИТ2), установленными в выходной цепи (после выходного фильтра). Один из датчиков используется в цепи обратной связи для стабилизации выходного тока; другой служит независимым измерителем тока и используется в системе контроля. Это позволяет с высокой степенью надежности обеспечивать (и контролировать) стабилизацию выходного тока с суммарной погрешностью, не превышающей 0,01%.

Электроника датчиков тока, а также усилитель обратной связи по выходному току источника расположены в блоке стабилизации тока (БСТ), откуда управляющий сигнал через сумматор поступает на схему управления транзисторами (СУТ). Введение обратной связи по напряжению (ОСН) позволяет в сочетании с входным фильтром (Др1 С1) эффективно подавлять пульсации выпрямленного напряжения сети.

Источник снабжен блоком компьютерного управления (БУ). Блок включает в себя 1-канальный 16-разрядный ЦАП, 8-канальный 24-разрядный АЦП, регистр ввода/вывода 8/8 внешних двоичных команд, последовательные интерфейсы CAN 2.0 и RS-485 для связи с ЭВМ, схему ЦП с ОЗУ 64К, последовательный интерфейс RS-232 для ручного управления. По последовательным интерфейсам также происходит загрузка программы работы блока в память (FLASH 128К) ЦП. Аналоговая часть подвешена относительно цифровой. АЦП имеет дифференциальный вход. Коммутатор двухпроводный с интегральными ключами на 8 каналов. Предусмотрено измерение нескольких аналоговых параметров источника (напряжений, температур) и сбор двоичной информации (контроль состояния блокировок, реле протока воды в нагрузке и т.д.). Блок позволяет производить дистанционное (компьютерное) включение/выключение силовой части источника.

### 3. Реализованные параметры

Источник имеет выходную мощность до 5кВт при КПД около 90%.

Различные модификации выходной части источника позволяют получить варианты с номинальными выходными токами 400; 200; 100; 50 при выходном напряжении от 12 до 100 вольт соответственно.

Суммарная погрешность стабилизации выходного тока не превышает 0.01%.

Источники допускают параллельное и последовательное соединения.

### 4. Конструкция источника

Источник занимает объем в один этаж конструктива "Вишня" (480x240x400 мм). В стойке «Евро-механика» Новосибирского производства может быть размещено до восьми источников ВЧ-300.

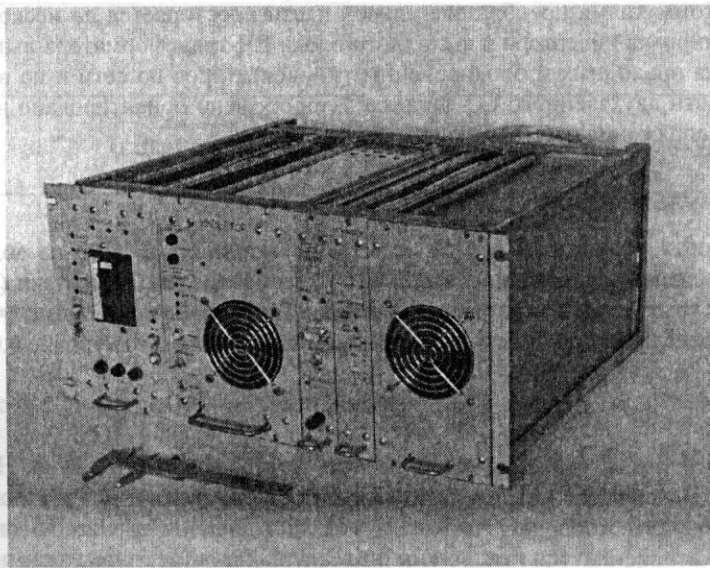
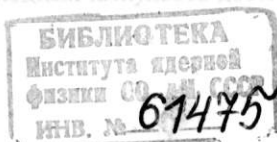


Рис. 2. Источник ВЧ-300.



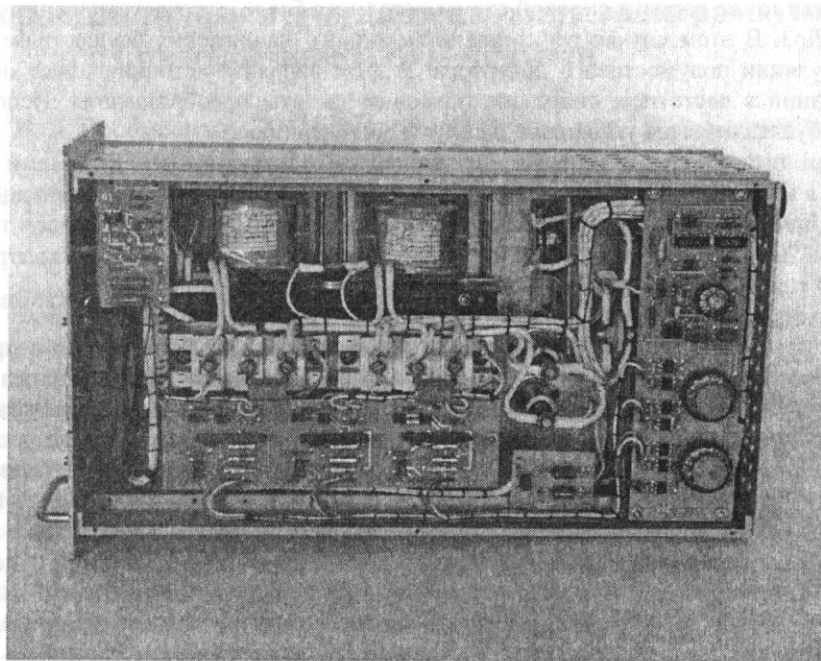


Рис. 3. Силовой блок инвертор.

Охлаждение источника автономное, воздушное. Конструктивно источник ВЧ-300 разбит на отдельные функционально законченные блоки, что облегчает обслуживание и ремонт, а также позволяет адаптировать источник к нестандартным вариантам его применения. Внешний вид ВЧ-300 и отдельно силового блока инвертора показан на фото (рис. 2, 3).

Использование полумостовой схемы инвертора (исключающей постоянную составляющую на выходе) при частоте преобразования 20 кГц позволяет выполнить ВЧ-силовой трансформатор из аморфного железа толщиной 20 мкм со значением максимальной индукции 0,4-0,5 Тл, что дает выигрыш по энергосогабаритным характеристикам в 2-3 раза по отношению к использованию на этой частоте ферритовых сердечников.

В процессе разработки большое внимание уделялось электромагнитной совместимости источника, так как спектр частот коммутации преобразовательной части простирается до нескольких мегагерц. С этой целью выполнена экранировка инвертора и выходного блока ВЧ-трансформатора-выпрямителя, также оказалась полезной установка проходных и блокировочных конденсаторов по сети и по выходу. Оправдано применение в выходной части двухзвенного LC-фильтра. Второе звено ориентировано на подавление гармоник пульсаций выходного напряжения в мегагерцовом диапазоне.

## 5. Испытания и результаты

Анализ полученных результатов в ходе испытаний источника ВЧ-300 на долговременную стабильность, включающих изменение напряжения сети ( $\pm 10\%$ ), сопротивления нагрузки ( $\pm 25\%$ ), а также на работу при температуре окружающего воздуха в диапазоне 20-50 градусов показал, что нестабильность выходного тока лежит в пределах погрешности измерительной аппаратуры (на уровне 0,005%).



# Высоковольтные наносекундные генераторы для питания кикеров ускорителей заряженных частиц

В.Н. Корчуганов, Ю.Г. Матвеев, Д.А. Шведов  
Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

## 1. Типы генераторов

В работе рассмотрены высоковольтные наносекундные генераторы (далее ВНГ) прямоугольных импульсов, разработанные в ИЯФ СО РАН для питания быстрых кикеров инъекции и экстракции ускорительно-накопительных комплексов. В этих генераторах в качестве коммутаторов используются импульсные водородные тиратроны и газонаполненные разрядники. При необходимости фронты импульсов ВНГ могут укорачиваться до 2–3 нсек в коаксиальных линиях, заполненных ферритовыми кольцами. Механизм укорочения фронтов импульсов рассмотрен в [7, 8]. В табл. 1 приведены основные параметры разных типов ВНГ.

Таблица 1. Основные параметры импульсов ВНГ на разрядниках и на тиратронах.

Рабочие параметры ВНГ	ВНГ на разрядниках	ВНГ на тиратронах с одинарными форм. линиями (ОФЛ). (Накопитель Нанохана, Япония)	ВНГ на тиратронах с двойными форм. линиями (ДФЛ). (Инжекция в бустер Наноханы)	ВНГ на тиратронах с ДФЛ и ферритовыми линиями-обострителями. (Выпуск из бустера Наноханы и БЗ-М (ВЭПП-2000))
Амплитуда выходных импульсов напряжения, кВ	$\leq 100$ (ВЭП-1, [1]) $\leq 50$ (ВЭПП-2 и Сибирь, [2, 3, 5,6]) $\leq 300$ (ВЭПП-3, [4])	12.5	25	25
Фронт импульса, нсек	2–5	$\geq 30$	$\geq 40$	2–3
Нестабильность синхронизации, нсек	$\pm 3$ [4] 1 (r.m.s) [5,6] $\pm 50$ [1]	$\leq 0.6$ (r.m.s)	$\leq 0.6$ (r.m.s)	$\leq 0.6$ (r.m.s)
Амплитуда тока кикера, кА	1	6	2	2

Примечание: в таблице в квадратных скобках [] указаны ссылки на литературу.

## 2. Генераторы с коммутаторами - разрядниками

В ИЯФ СО РАН в связи с разработкой метода встречных заряженных пучков возникли задачи однооборотной инъекции и экстракции в ускорителях и накопителях. Изначально ускорители имели малые размеры и соответственно малые времена обращения частиц. Эти обстоятельства потребовали создания генераторов с короткими прямоугольными импульсами, имеющими крутые фронты и срезы.

Для установки ВЭП-1 был создан ВНГ однополярных импульсов [1] на 3 газонаполненных разрядниках с подвижными электродами. Амплитуда выходных импульсов достигала 100 кВ при длительности 14 нсек и

с фронтами 1 нсек. При этом использовались разрядники разных типов (тригatron, обостритель и разрядник, закорачивающий «хвосты импульса»).

Основными недостатками этого генератора являлись нестабильность синхронизации (до  $\pm 50$  нсек) и низкая эффективность устранения послеимпульсов, поэтому кикеры питались от одного генератора.

Для накопительного комплекса ВЭПП-2 были созданы более совершенные ВНГ на одностипных газонаполненных трехэлектродных разрядниках [2, 3] с подвижными электродами. Нестабильность синхронизации была уменьшена до нескольких наносекунд. Эксплуатация генераторов осложнялась необходимостью периодической проочки маслозаполненных высоковольтных вводов и кабелей.

Для комплекса ВЭПП-3 был создан генератор с максимальной амплитудой импульсов до 300 кВ и частотой следования импульсов до 25 Гц для работы на несогласованную нагрузку. Времена фронтов нарастания и спада  $\approx 3$  нсек [4].

Для комплекса источника СИ «Сибирь-2» (РНЦ им. Курчатова, г. Москва) созданы новые ВНГ на газонаполненных разрядниках [5, 6] со следующими особенностями:

- выходы генератора имеют разнополярные импульсы,
- разработана очень простая схема с одним импульсным источником питания,
- формирующие линии выполнены двухступенчатыми (ДФЛ), что уменьшило требования к изоляции ВВ-трансформатора, формирующих линий и разрядников,
- разрядники выполнены с неподвижными электродами,
- переход на использование газовой изоляции вместо масляной, что резко упростило эксплуатацию и удешевило производство генераторов.

Среднеквадратичное значение джиттера удается поддерживать на уровне 1 нсек.

Принципиальная схема нового биполярного генератора, разработанного на базе ВНГ для Сибири-2, показана на рис. 1. Двойные формирующие линии заряжаются параллельно от низковольтного импульсного источника питания «ГИМН» через повышающий трансформатор TR1 и зарядные сопротивления 12 кОм. После прихода поджигающего импульса на средний электрод 3-электродного разрядника формирующие линии последовательно разряжаются в нагрузку (пластины кикера). Полярность выходного импульса определяется способом включения разрядника в цепь разряда формирующей линии. Этот генератор имеет два 50-омных разнополярных выхода. Амплитуда выходных импульсов до 50 кВ, длительность на полувысоте 10 нсек, фронт 1.5–2 нсек и срез  $\approx 4$  нсек. Для улучшения стабильности синхронизации в цепи поджига применены две спиральные линии по 600 Ом. Поэтому нестабильность синхронизации (среднеквадратичное отклонение) не превышает 1 нсек.

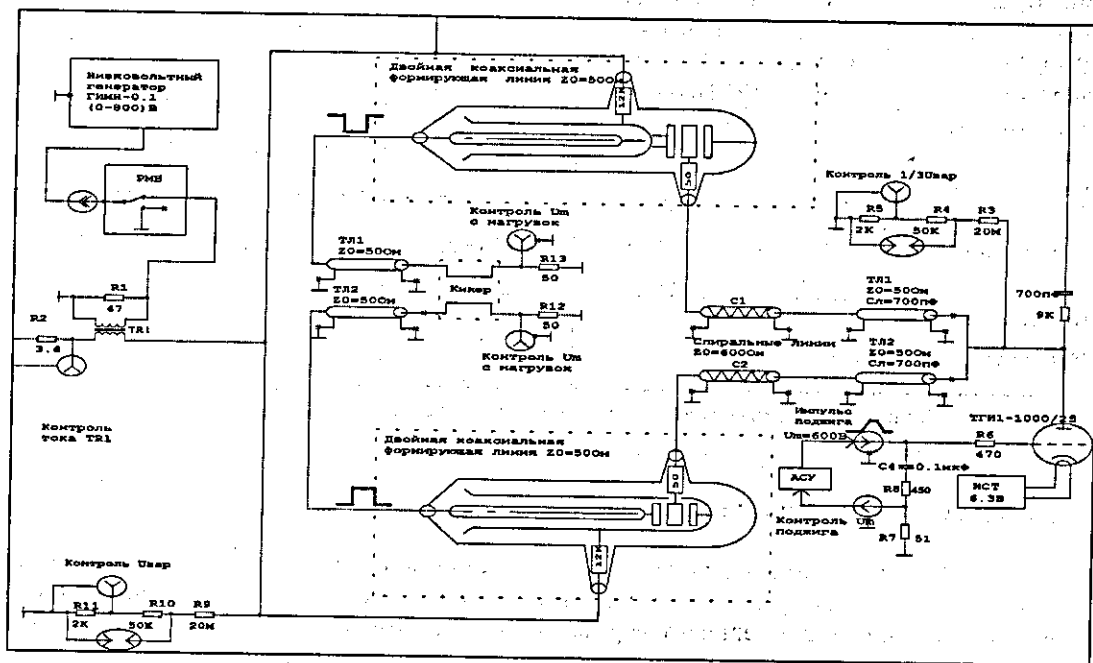


Рис. 1. Принципиальная схема биполярного генератора с коммутаторами на 3-электродных разрядниках с двойными формирующими линиями с распределенными параметрами. Выходное сопротивление генератора 50 Ом.

Спиральные линии (С1 и С2) увеличивают амплитуду импульсов поджига, что несколько уменьшает джиттер и увеличивает динамический диапазон перестройки разрядников. Электрическая длина формирующих линии  $\approx 10$  нсек. Ресурс работы разрядников (без регулировки зазоров или смены электродов) составляет десятки миллионов импульсов.

### 3. Генераторы с тиратронными коммутаторами

В достаточно больших установках с большими периодами обращения частиц ( $> 90$  нсек) требования к крутизне фронтов импульсов ВНГ снижаются. В связи с этим стало актуальным использование для задач инжекции-экстракции генераторов с тиратронными коммутаторами-тиратронами (с водородным заполнением), эксплуатация которых проще и дешевле.

Разработанные тиратронные генераторы различаются:

1. По типу используемых формирующих линий:
  - а) линии одинарные и двойные;
  - б) с распределенными и с сосредоточенными параметрами;
  - в) газонаполненные и без газового заполнения.
2. По наличию или отсутствию дополнительного обострения перепадов (фронтов и срезов), получаемых с помощью ферритовых линий.
3. По величине выходного сопротивления.

Для всех разновидностей описанных в этой работе генераторов на тиратронах общими являются:

- а) использование накала тиратронов, стабилизированного до  $\pm 5 \cdot 10^{-4}$ ;
- б) максимальное зарядное напряжение формирующих линий не превышает 25 кВ;
- в) наличие экранирующего кожуха, общего для тиратрона и формирующей линии;
- г) наличие шкафа с приборами защиты от попадания под напряжение (заземлитель, блокировки).

Стабилизация накала тиратронов до  $\pm 5 \cdot 10^{-4}$  необходима для надежного ограничения нестабильности их запуска меньше 1 нсек.

*Тиратронный генератор на двойной формирующей линии с сосредоточенными параметрами, с последующим обострением с помощью ферритовой линии* планируется поставить на комплексе ВЭПП-2000 в Институте ядерной физики СО РАН вместо генератора на 3-электродном разряднике с последовательным управлением типа [7]. Кроме того, подобным генератором предполагается оснастить кикеры экстракции бустера – синхротрона комплекса Нанохана, Япония [9].

На рис. 2 изображена принципиальная схема генератора. Основными элементами схемы являются:

- ГИМН-0,1 – импульсный стабильный (до  $2 \cdot 10^{-3}$ ) источник питания с напряжением (0-800) В,
- TR1 – высоковольтный импульсный повышающий трансформатор,
- R2 – резистор, задающий зарядный ток формирующей линии,
- R3 – контроль тока трансформатора,
- Rш – резистор контроля тока тиратрона,
- R5, R6 – резисторы, образующие делитель в цепи поджига тиратрона,
- ТЛ1-ТЛ4 – транспортные линии (50-омные кабели),
- коаксиальные ферритовые линии с длиной 800 мм, заполненные кольцами M20×12×6 1000НН мм;
- Rн – оконечные согласующие нагрузки с измерительными делителями для контроля амплитуды импульсов тока и напряжения, проходящих через ферритовые линии.

Двойная формирующая линия состоит из двух ступеней, которые заряжаются параллельно, а разряжаются последовательно. Каждая ступень состоит из двух секций, так же включенных параллельно. Каждая секция состоит из 8 ячеек. Каждая ячейка образуется двумя последовательно включенными конденсаторами с емкостью 470 пФ и индуктивностью 74 нГн. Каждая секция имеет волновое сопротивление 25 Ом, а каждая ступень 12,5 Ом. Так как при срабатывании тиратрона ступени разряжаются последовательно, то выходное сопротивление генератора равно 25 Ом.

Запуск тиратрона производится на вершине зарядного напряжения. Резистор R1, стоящий в первичной обмотке трансформатора, вносит большое затухание в колебательный контур, уменьшая амплитуду зарядного напряжения во втором и третьем полупериодах до 20% от напряжения в первом полупериоде во избежание повторных срабатываний тиратрона. Резистор R2 обеспечивает развязку формирующей линии при ее разряде от зарядной цепи. Накал тиратрона питается стабилизированным источником напряжения на 6.3 В, что обеспечивает малый джиттер выходных импульсов.

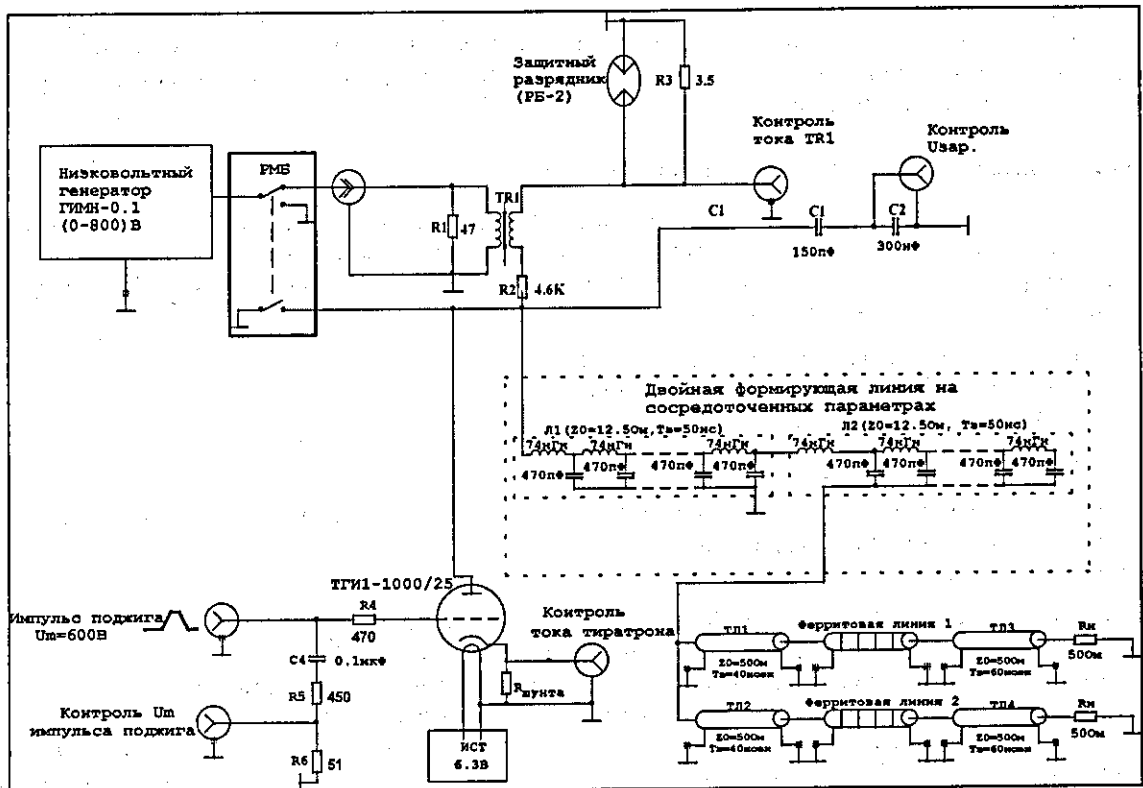


Рис. 2. Принципиальная схема генератора на двойной формирующей линии со сосредоточенными параметрами и обострением на ферритовых линиях.

Для безопасного обслуживания имеется размыкатель РМБ. Он разрывает питающую сеть, снимает высокое напряжение при открывании дверей металлического шкафа, в котором располагается генератор. Источник питания ГИМН через повышающий высоковольтный трансформатор TR1 заряжает двойную формирующую линию на сосредоточенных параметрах до рабочего напряжения (не более 25 кВ). В этот момент тиратрон, запущенный триггером от схемы управления, разряжает формирующую линию на нагрузку через транспортные линии и две параллельно включенные коаксиальные ферритовые линии. На ферритовых линиях фронт импульса укорачивается до 2-5 нсек и далее поступает на согласующую активную нагрузку с измерительным делителем на конце или непосредственно на кикер.

На рис. 3 приведены осциллограммы выходных импульсов этого генератора, снятые осциллографом TDS-3032.

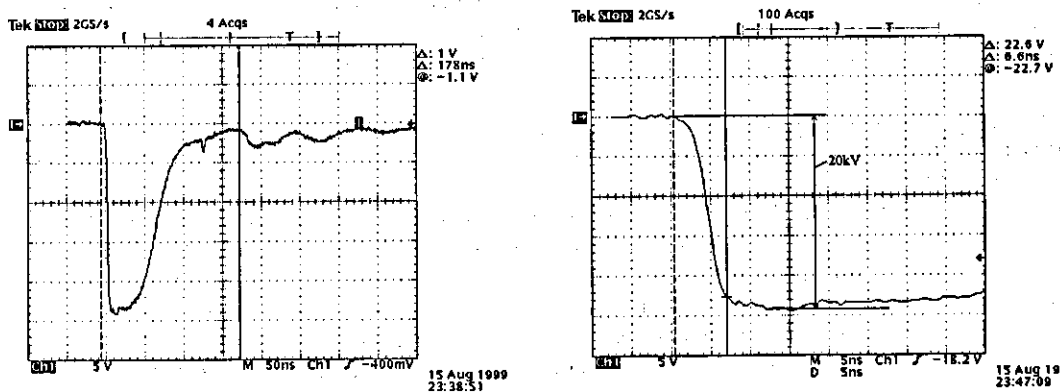


Рис. 3. Осциллограммы импульсов с выхода ферритовых линий на нагрузке 50 Ом. Время нарастания на уровне 0.1-0.9  $t_0=3$  нсек получено за счет обострения ферритовыми линиями. Временной масштаб по горизонтальной оси 50 нс/см и 5 нс/см.

## Литература

- [1] Б.Г. Ерозолимский, Ю.Г. Матвеев и др. Генератор одиночных наносекундных импульсов высокого напряжения. ПТЭ, №2, 1963, с. 93-97.
- [2] А.В. Киселев. Доклады Всесоюзного совещания по ускорителям со встречными пучками и физике частиц сверхвысоких энергий, ч.1, 1963, Новосибирск, с. 113-141.
- [3] А.В. Киселев. Диссертация. - Новосибирск, 1965.
- [4] А.А. Авдиенко, Ю.Г. Матвеев и др. «Мощный высоковольтный наносекундный генератор». ПТЭ, №2, 1977, с. 129-131.
- [5] A. Kadnikov, Y. Matveev. Experimental investigation of high voltage nanosecond generators of injection system for «Siberia-2» storage ring. Proceedings of the 1993 Particle Accelerator Conference. v. 2, p.1348.
- [6] V. Korchuganov, Y. Matveev, D. Shvedov. High Voltage nanosecond generators for «Siberia-2». Proceedings of the 1995 Particle Accelerator Conference and International Conference on High Energy Accelerators, v.2, p. 1266, WAA18.
- [7] Ю.Г. Матвеев, Д.А. Шведов. Коаксиальные линии с ферритовым заполнением для обострения перепадов мощности. - Новосибирск, Институт ядерной физики СО РАН, 2000 (в печати).
- [8] И.Г. Катаев. Ударные электромагнитные волны. «Советское радио», Москва, 1963.
- [9] V. Korchuganov, E. Levichev, N. Mezentsev, V. Sajaev, K. Takahashi, K. Aizawa, S. Kamia, Y. Oku, K. Ohwaki. The Nanohana 2 GeV Synchrotron light source. NIM A448 (2000) 27-31.

## Изучение многооборотной инжекции в компактный протонный синхротрон

И.Е. Жуль, А.Н. Кирпотин, В.Е. Пальчиков, М.В. Петриченко

Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Приводятся результаты экспериментов по многооборотной инжекции в компактный протонный синхротрон, рассчитанный на энергию 200 МэВ при использовании импульсных одновитковых диполей с полем до 5 Т. Инжекция осуществляется по вертикали путем предварительного искажения медианной плоскости на первой гармонике с линейным по времени выключением искажения за время 10–30 оборотов. Инжектором служит 1-МэВ ускоритель-тандем оригинальной конструкции. Описывается система автоматизации эксперимента и управления синхротроном.

На протяжении ряда лет в ИЯФ СОРАН ведется работа по созданию компактного протонного синхротрона для протонной терапии раковых заболеваний [1, 2]. Ускоритель рассчитан на энергию протонов 80–200 МэВ. Магнитная система состоит из 4 импульсных одновитковых дипольных 90° магнитов с максимальным полем 5 Т и четырех квадрупольных линз, по одной в каждом промежутке (см. рис.1). Питание магнитов и линз раздельное, что позволяет настраивать рабочую точку, варьируя градиент поля в линзах. Для работы выбрана рабочая точка с  $\nu_z = 0.43$ ,  $\nu_r = 1.43$  при градиенте поля в линзах  $G = 40 \text{ E/cm}$  на энергии 640 кэВ.

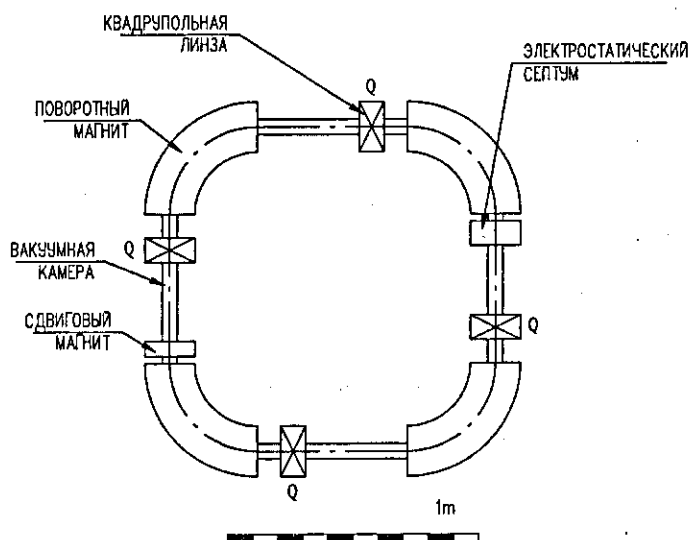


Рис. 1: Магнитная система ускорителя.

Инжекция осуществляется по вертикали путем создания линейно спадающе-го во времени (за 10–15 оборотов) сдвига медианной плоскости ускорителя в сторону выходного окна септум-магнита. Такой сдвиг создается посредством специального сдвигового магнита [1], расположенного в пустом промежутке симметрично месту впуска ( $\nu_z = 0.43$ ). Интеграл поля в магните  $\approx 2.5 \text{ kOe}\cdot\text{cm}$  [1]. Сдвиговый магнит питается синусоидальными импульсами тока, для инжекции используется линейно спадающая часть заднего фронта длительностью  $5 \div 7 \mu\text{s}$ , что соответствует 10–15 оборотам. Соответственно, эмиттанс инжектируемого пучка должен быть как минимум в 15 раз меньше акцептанса ускорителя.

В качестве инжектора используется электростатический ускоритель-тандем оригинальной конструкции, разработанный в ИЯФ. Ионы  $H^-$  с энергией около 20 кэВ ускоряются до половинной энергии 320 кэВ, затем обдираются на воздушной мишени в центре ускорителя, и полученные протоны ускоряются далее до полной энергии 640 кэВ.

Транспортный канал состоит из двух поворотных магнитов и трех квадрупольных линз. Впуск в ускоритель осуществляется с помощью электростатического септума с толщиной ножа 0.3 мм и окном  $\pm 0.3 \times \pm 0.6 \text{ cm}^2$ . Эмиттанс пучка инжектора равен  $\epsilon_{inj} \approx \pi \text{ cm} \cdot \text{mrad}$  при вертикальном акцептансе ускорителя  $A_z \approx 7.8\pi \text{ cm} \cdot \text{mrad}$ . Ток инжектируемого пучка 2 мА при максимальной эффективности прохождения пучка через канал до 90 %.

В 1997 г. на прототипе данного ускорителя была проведена начальная серия экспериментов по изучению инжекции пучка на энергию 640 кэВ при полях в магнитах 2.7 кГс. Апертура магнитов прототипа равна  $40 \times 40 \text{ мм}^2$ .

Предварительно динамика инжекции была исследована с помощью компьютерного моделирования. В результате получилось, что эффективное число оборотов инжекции составляет  $\sim 9$ , что примерно соответствует соотношению вертикального акцептанса ускорителя и эмиттанса инжектируемого пучка. График эффективности захвата частиц в зависимости от времени впуска при 15-оборотной инжекции приведен на рис. 2.

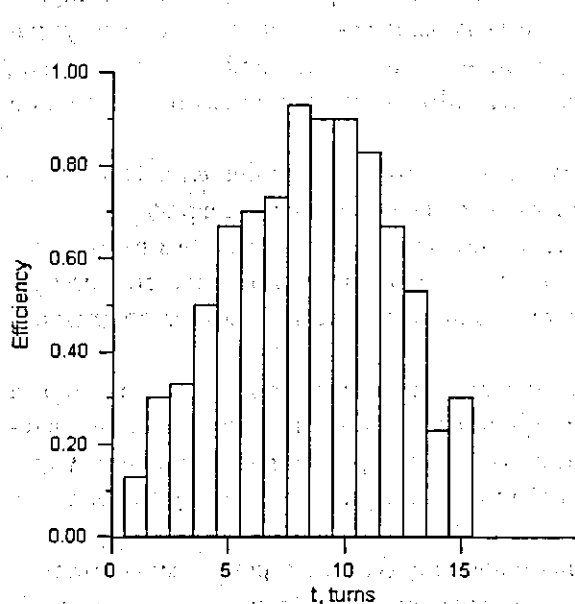


Рис. 2: Динамика 15-оборотной инжекции.

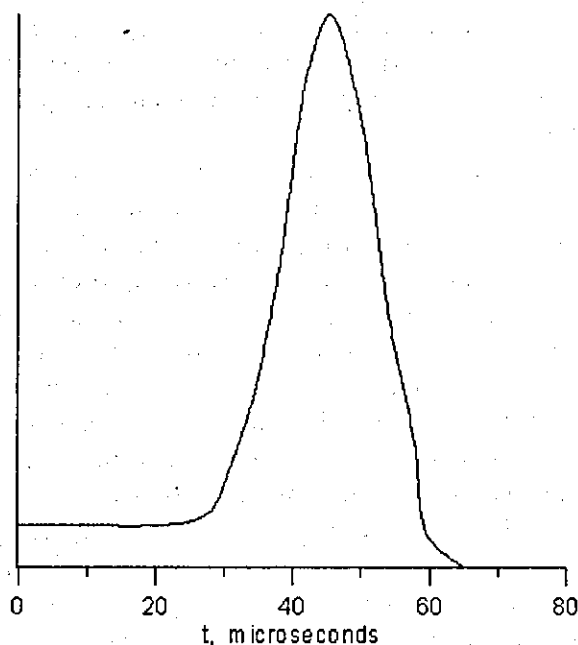


Рис. 3: Оциллограмма сигнала с коллектора.

Зависимость получена при  $\Delta p/p = 0.5\%$ , угловом разбросе в пучке  $\pm 0.002$  рад,  $E = 640$  кэВ,  $G = 40 \text{ Ое/см}$ , максимальном угле сдвигового магнита 0.013 радиан. Простые вычисления показывают, что для накопления  $\sim 6 \cdot 10^{10}$  частиц, что является пределом по пространственному заряду, достаточно тока инжекции 2.3 мА при эффективности инжекции 0.6 на 15 оборотах.

Ток захваченного пучка в эксперименте измерялся датчиком, состоящим из тороидального трансформатора с усилителем. Инжектированный пучок не ускорялся, поэтому время его жизни ограничивалось его дрейфом на внешний радиус при спаде поля в магнитах, питаемых синусоидальными импульсами тока, и составляло около 1000 оборотов ( $\approx 450 \mu\text{s}$ ), после чего пучок высаживался на коллектор, расположенный на внешнем радиусе поворотного магнита. Оциллограмма сигнала на коллекторе приведена на рис.3.

Ширина пика в несколько десятков оборотов соответствует наблюдаемому радиальному размеру пучка, который определяется эмиттансом инжектируемого пучка и его энергетическим разбросом. Ток, захваченный в ускоритель, был равен  $1.2 \div 1.5 \text{ мА}$ , что соответствует измерениям числа протонов, выходящих на коллектор, —  $4 \div 5 \cdot 10^9$ .

Эксперименты носили предварительный характер и проводились при неоптимальном согласовании инжекционного тракта и ускорителя — септум-магнит не был корректно выставлен и уменьшал апертуру ускорителя, что наблюдалось во время экспериментов. После тщательной юстировки можно ожидать увеличения количества захваченных частиц до расчетной величины  $4 \div 6 \cdot 10^{10}$ .

В процессе экспериментов по инъекции была отработана система управления ускорительным комплексом.

Аппаратная часть системы управления была собрана из типовых КАМАК-модулей, разработанных в ИЯФ. В качестве управляющего компьютера использовалась IBM PC.

Программное обеспечение построено по схеме "клиент-сервер". "Сервер", или в другой терминологии, "система сбора данных", обеспечивает функционирование аппаратуры и состоит из управляющего ядра, коллекции драйверов и унифицированного интерфейса для обслуживания запросов клиентских приложений.

"Клиентские приложения" — это программы, посредством которых оператор манипулирует установкой. Для собственно управления есть две возможности — занести во все управляющие элементы (или в любое их подмножество) заранее подготовленный массив данных, или вручную подстраивать отдельно выбранный элемент. Можно также запомнить текущий режим.

Другая группа приложений информирует оператора о состоянии ускорителя. Это табло для индикации точек контроля и многоканальный быстрый цифровой осциллограф.

В отдельную группу можно выделить программы, работающие автономно, без взаимодействия с оператором. Это "сторож", который следит за тем, чтобы контролируемые параметры не вышли из нормы, а также программа, которая отслеживает и компенсирует медленные дрейфы поля в магнитах (с точностью до  $10^{-5}$ ).

К управляющей аппаратуре клиентские приложения имеют доступ не непосредственно, а только через сервер. Все каналы управления унифицированы, аппаратно зависимые характеристики каналов скрыты от клиентских приложений. Предусмотрено преобразование управляющих данных (в первом приближении — масштабирование), благодаря чему клиентские программы работают с физическими параметрами, а не с управляющими кодами.

Структура программного обеспечения была тщательно продумана с целью максимально облегчить настройку оборудования и неизбежную перманентную модификацию программ. В тексте программ нет никаких предположений о конфигурации управляющей аппаратуры, конфигурация задается в текстовом файле, файл этот читается сервером при запуске. Добавление новых блоков, перемещение их на другие позиции, изменение их параметров не требуют ничего, кроме редактирования соответствующей строки в файле. Идеология максимальной мобильности программного обеспечения использовалась и при автоматизации других экспериментальных комплексов [3, 4].

Описанный комплекс программ для управления ускорительным комплексом реализован на языке "C" и может работать под MS DOS, Windows-95/98 и после минимальной модификации под UNIX.

## Список литературы

- [1] *I.I. Averbukh et al.* "Project of small-dimensional 200 MeV proton synchrotron", EPAC-88, Rome, June 7-11, vol. 1, p. 413.
- [2] *L. Picardi, C. Ronsivalle, A. Vignatti, G. Silvestrov, T. Vsevolozhskaya, R. Bartolini.* "Preliminary design of a technologically advanced and compact synchrotron for proton therapy", RT/INN/94/20.
- [3] *А. С. Донин, А. Н. Курпотин, Ю. В. Коваленко, В. Я. Савкин.* "Система управления инжекторным комплексом установки АМБАЛ-М", ИЯФ 99-88.
- [4] *A. B. Boldyrev, A. N. Kurpotin et al.* "Investigation of Atmospheric Turbulence, Velocity and Direction of a Wind and Doppler Spectrum Sea Echo by Quasi-Coherent Pulse Radar at Frequency of 150 MHz". PIERS-96, Innsbruck, Austria, July 8-12.