

B381.1

B.85

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ  
ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ СССР

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

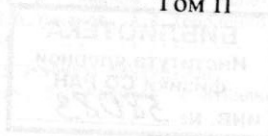
ОГЛАВЛЕНИЕ

Д9-92-235

# ТРУДЫ XII ВСЕСОЮЗНОГО СОВЕЩАНИЯ ПО УСКОРИТЕЛЯМ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Москва, 3—5 октября 1990 г.

Том II



Дубна 1992

~~28.2.3.~~

336.

B381.1 | 58083

B.85 | Всесоюз. совещ.

по ускорителям заряженных  
частиц (12),  
1990, Москва, Труды

58083

ч.3.

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИСТОЧНИКА ВЛЭПП

Л.Н.Арапов, В.Е.Балакин, Ю.Г.Бамбуров, Ю.Д.Валеев, С.Ю.Казачков, В.Ф.Кляев, Г.И.Кузнецов, Д.Е.Куклин, Г.С.Крайнов, А.В.Ларионов, А.Н.Лукин, О.В.Пирогов, А.Н.Сандалов, Н.А.Соляк, В.Е.Теряев, И.Г.Хавин, В.И.Чашурин, В.В.Широков, Г.И.Яснов

Институт ядерной физики СО АН СССР, Новосибирск

В проекте комплекса ВЛЭПП [1] предполагается использовать ускоряющие структуры с темпом ускорения порядка 100 МэВ/м. Для этого необходимы адекватные источники СВЧ-мощности. Если изучение возможности получения таких градиентов было проведено с использованием серийных генераторов с длиной волны 10 см и мощностью 20 МВт [2], то переход к реальной структуре на длине волны около 4 см (7 ГГц) потребовал создания нового прибора типа Гирокон, на котором получена мощность до 65 МВт в импульсе длительностью 0,8 мксек [3].

В 1988 году в результате оптимизации параметров ВЛЭПП была выбрана ускоряющая структура на бегущей волне с частотой 14 ГГц [4].

Предварительный анализ показал, что оптимальным вариантом генератора может стать усилительный релятивистский клистрон с параметрами  $U_0 = 1000$  кв,  $I_0 = 300$  А, электронным к.п.д. 50% и коэффициентом усиления 80 дБ. Схематическая конструкция клистрона приведена на рис.1. Прибор состоит из ускорительной трубки (3) с электронной пушкой (1).

Электронный пучок необходимой длительности получается с помощью управляющей сетки (2) и направляется в канал группирования (6).

Для фокусировки пучка используется магнитная периодическая фокусирующая система (МПФС) на основе постоянных магнитов из сплава неодим-железо-бор [5], имеющего энергетическое произведение ВН лучше 30 МГсЭ.

Из выходной системы (8) с помощью трансформатора типа волны СВЧ-мощность направляется в два волновода и через керамические окна в ускоряющую секцию. После выходной системы пучок сбрасывается в коллектор (10). Для согласования параметров пучка с МПФС в первом варианте прибора предусмотрена магнитная линза (5).

Для расчета ЗОС с катодом и управляющей сеткой использовался пакет программ POISSON-2. Сетка и катод моделировались набором концентрических колец. Необходимые параметры пучка подбирались изменением формы катода, сетки и электродов ускорительной трубки. При сферическом катоде диаметром 120 мм и радиусом сферы 100 мм, при напряжении на ускорительной трубке 1 МВ и током в пучке 300 А расчетный эмиттанс пучка меньше  $2 \cdot 10^{-2}$  уград.см.

При численном моделировании прохождения пучка через МПФС использовались пучки в виде трубок тока с учетом пространственного заряда и

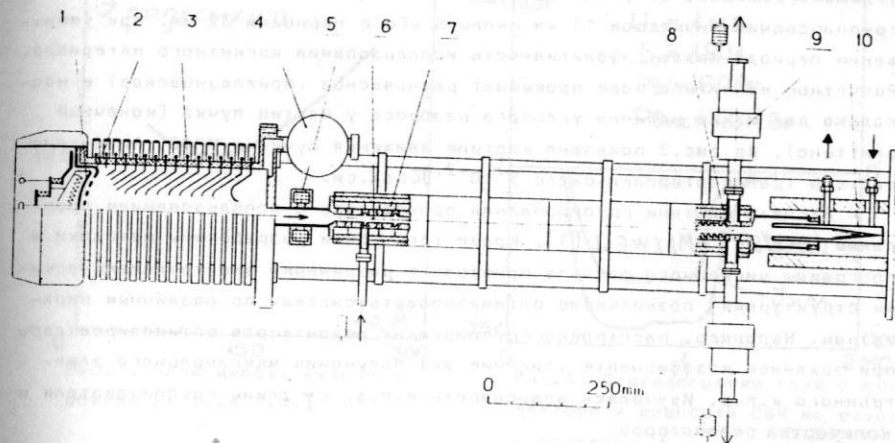


Рис.1. Генератор СВЧ:

1 - катод, 2 - сетка управляющая, 3 - трубка ускорительная, 4 - насос вакуумный, 5 - линза магнитная, 6 - канал группирования, 7 - система магнитная, 8 - система выходная, 9 - окно СВЧ.

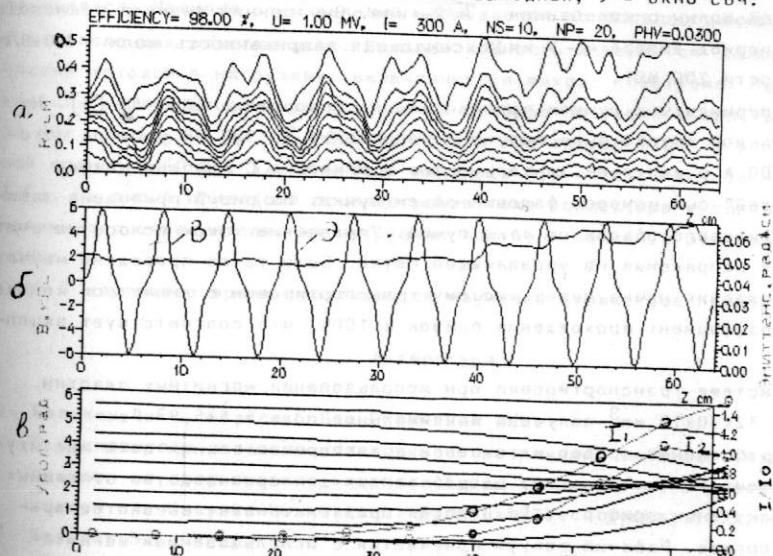


Рис.2. Изменение параметров пучка в клистроне (расчет):

а - огибающая пучка для 10%, 20%...100% полного тока пучка, б - магнитное поле на оси и эмиттанс пучка, в - группировка частиц по фазе,  $I_1$  и  $I_2$  - первая и вторая гармоники тока.

углового разброса в пучке. Оптимальная величина поля МПФС для канала группирования диаметром 11 мм около 6 кГс с периодом 32 мм. При уменьшении периода падает эффективность использования магнитного материала. Расчетное магнитное поле превышает равновесное (бриллюэновское) в несколько раз из-за наличия углового разброса у частиц пучка (конечный эмиттанс). На рис. 2 показана картина движения пучка в МПФС. Акцентанс системы транспортировки — около  $5 \cdot 10^{-2} \cdot \pi$  рад.см.

Расчеты системы группирования проводились с использованием программы LANS [6] и MAXWELL [7]. Кроме того, были разработаны методики и программы численного расчета приборов с различными электродинамическими структурами, позволяющие оптимизировать систему по различным параметрам. Например, расстройка группирующих резонаторов оптимизировалась при заданном коэффициенте усиления для получения максимального электронного к.п.д. Изучалась зависимость к.п.д. от длины группирователя и количества резонаторов.

Расчитанный группирователь содержит 11 резонаторов, расставленных через 64 мм. Зазоры резонаторов 10 мм. Расчетный максимальный к.п.д. — 65% при коэффициенте усиления 80 дБ и полосе пропускания 50 МГц.

Выходная система клистрона для уменьшения напряженности поля на поверхности металла выбрана в виде круглого диафрагмированного волновода бегущей волны с колебанием  $\pi/2$ -типа. Внутренний диаметр волновода — 16 мм и период диафрагм — 5 мм. Максимальная напряженность поля — 700 кВ/см при мощности 200 МВт.

Эксперименты с пучком проводились на ускорителе ЭЛИТ-Л2 [8]. На ускорительной трубке было получено напряжение до 1,2 МВ и пучок с током до 300 А в импульсе длительностью 0,8 мкс. С помощью метода "трех щелей" был измерен фазовый объем пучка. На рис. 3 приведена зависимость фазового объема от тока пучка. Управление током велось за счет изменения напряжения на управляющей сетке. Было также проведено изучение прохождения пучка через систему транспортировки с диаметром канала 11 мм. Коэффициент прохождения близок к 100%, что соответствует акцентансу.

В системе транспортировки при использовании магнитных пластин размером  $32 \times 30 \times 10$  мм<sup>3</sup> получено максимальное поле  $5,5 \pm 5,9$  кГс.

Разработанный прибор изготовлен в экспериментальном цехе института с применением технологий, разработанных для производства отпаянных электровакуумных приборов. Технология предусматривает высокотемпературный прогрев. Рабочий вакуум получается с использованием магнито-разрядного насоса. После установки на стенд клистрон был прогрет до 200°C.

Измеренный коэффициент прохождения пучка через клистрон при токах до 200 А  $40 \pm 70\%$ . При токах около 80 А в приборе возникают СВЧ-ко-

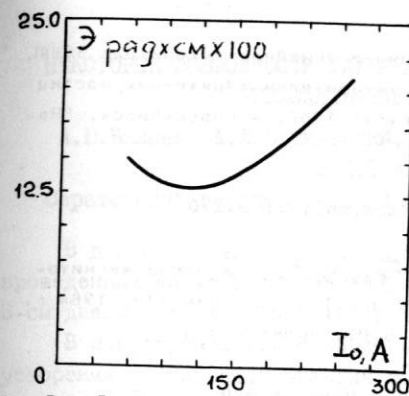


Рис. 3. Зависимость фазового объема от тока пучка.

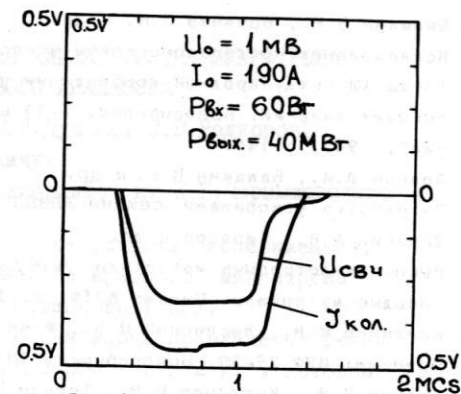


Рис. 4. Осциллограммы тока в коллекторе и мощности СВЧ на выходе клистрона.

лебания, которые приводят к уменьшению коэффициента прохождения.

При подаче возбуждения на входной резонатор порог появления этих колебаний повышается. В приборе, кроме того, наблюдается вторично-эмиссионный разряд и пробой, уровень появления которых постепенно увеличивается. Наличие этих явлений наблюдается по осциллограммам мощности в направленных ответвителях. Средняя мощность измеряется калориметрическим методом в нагрузках, включенных на выходе клистрона. После нескольких десятков часов тренировки на приборе получена мощность более 55 МВт при U<sub>0</sub> = 1 МВ, I<sub>0</sub> ≈ 200 А, токе в коллекторе 110 ± 130 А при выходной мощности 60 Вт. Длительность импульса — 0,6 мксек, частота повторения — 2 Гц. На рис. 4 приведена осциллограмма тока коллектора и сигнала с направленного ответвителя. На нагрузках получено более 70 Вт средней мощности.

В настоящее время продолжается изучение параметров прибора.

#### Литература

1. Балакин В.Е., Будкер Г.И., Скринский А.Н. О возможности создания установки со встречными электрон-позитронными пучками на сверхвысокие энергии. Труды У1 Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978. — Дубна, 1979, с. 27.
2. Балакин В.Е. и др. Ускоряющая структура ВЛЭПП. Исследование максимально достижимого темпа ускорения. Труды У1 Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978. — Дубна, 1979, с. 140.

3. Балакин В.Е., Брежнев О.Н. и др.  
Исследование предельного темпа ускорения в линейном ускорителе ВЛЭПП. Труды XIII Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий. Новосибирск, 7-11 августа 1986. - Новосибирск, "Наука", 1987, с.144.
4. Арапов Л.И., Балакин В.Е. и др.  
Разработка ускоряющей секции ВЛЭПП. Наст.сб., т.1, с.190.
5. Дерягин А.В., Тарасов и др.  
Высокоанизотропные магнетики  $Nd_{15-x}Fe_{25+3x}B_3$  и новые магнитотвердые материалы. Письма ЖЭТФ, т. 39, вып.11, стр. 516-519, 1984 г.
6. Карлинер М.М., Лысянский П.Б., Фомель Б.М., Яковлев В.П.  
Препринт ИЯФ 79-59, Новосибирск, 1979.
7. Иванов В.Я., Карлинер М.М., Теряев В.Е., Яковлев В.П.  
ЖВМ и МФ, 12, 1900-1906, Москва, 1986.
8. Балакин В.Е., Бамбуров Ю.Г. и другие.  
Генератор электронного пучка ЭЛИТ-Л2. 1У Всесоюзный симпозиум по сильноточной электронике. Тезисы докладов (часть П), с.97. - Томск: ТПИ - 1982 г.

### НЕКОТОРЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ УЛУЧШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОТРОНА ТРЕХСАНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

А.Ю.Балаев, А.А.Вишневикий, В.Н.Дудкин, С.В.Родионов,  
В.П.Степанчук

Саратовский государственный университет им.Н.Г.Чернышевского

В докладе представлены основные результаты экспериментов, проведенных на втором экземпляре малогабаритного микротрона 3-см диапазона на 5 МэВ /I/, разработанного в СГУ.

В микротронах коротковолнового диапазона применяется режим ускорения с приростом энергии порядка 300 кэВ / 2 /, в котором вертикальный размер катода обычно составляет не более, чем 0,2 безразмерные единицы / 3, 4 / (в работе / 5 / указывается на возможность его увеличения до 0,24), а реализуемый на практике коэффициент захвата в резонансный режим ускорения не превосходит  $1,5 \div 2\% / 3, 4 /$ . Нами ранее / 1,4 / использовался цилиндрический катод с безразмерным диаметром  $d_k = 0,196$ , который устанавливался с заглаблением относительно плоскости крышки резонатора в катодном отверстии конической формы. Отметим, что размеры конического отверстия и величина заглабления брались с учетом результатов работы / 6 /, полученных для режимов ускорения второго типа со сходной траекторией частиц. Для повышения эффективности применяемого режима ускорения был осуществлён экспериментальный подбор формы и размеров катодного отверстия и величины заглабления в нем катода.

Для ранее используемого прямонакального катода из гексаборида лантана с  $d_k = 0,196$  наилучшие результаты были получены для отверстия  $d_o = 0,275$ , имеющего коническую фаску с углом  $\alpha = 90^\circ$  на глубину  $h = 0,155$ . При заглаблении катода  $\delta \approx 0,18 \div 0,20$  коэффициент захвата на I4-й орбите составил  $2,5 \div 2,6\%$ , и было получено импульсное значение тока ускоренного пучка  $9,2 \text{ mA}$ , что, видимо, является наибольшим в настоящее время показателем для микротронов 3-см диапазона. При этом, однако, катод работает с некоторым перекалом, что не позволяет считать полученное значение тока эксплуатационным.

В ходе дальнейших экспериментов диаметр катода был последовательно увеличен до 0,324. Наилучшие характеристики режима были получены при  $d_k = 0,284$ . Для конического отверстия с  $\alpha = 120^\circ$ ,  $h = 0,12$  и при заглаблении катода  $\delta = 0,2 \div 0,21$  коэффициент захвата достигал  $3 \div 3,5\%$ . Для большего диаметра  $d_k = 0,324$  коэффициент захвата снижался до  $2 \div 2,2\%$ .

Л.Л.Данилов, Г.М.Казакевич, В.Н.Марусов,  
Г.И.Сильвестров, И.Г.Сильвестров

Институт ядерной физики СО АН СССР, Новосибирск

В ИЯФ СО АН ведутся работы по созданию малогабаритного электронного синхротрона на энергию 200-300 МэВ, который будет использоваться в качестве инжектора в накопителях - источниках СИ для технологических целей [1]. Импульсные дипольные магниты синхротрона имеют радиус поворота 43 см, что позволяет иметь габаритные размеры ускорителя  $2 \times 2 \text{ м}^2$  и осуществить его компоновку на одной жесткой платформе. Таким образом, синхротрон представляет собой компактную транспортабельную установку общей массой  $\sim 3 \text{ т}$ . В качестве адекватного инжектора выбран микротрон 10 см диапазона на энергию  $\sim 8 \text{ МэВ}$ , работающий в первом типе ускорения. Микротрон располагается непосредственно над синхротроном, в его центре, на той же платформе. Выведенный из микротрона пучок поворачивается в горизонтальной плоскости на угол  $135^\circ$  и парой  $30^\circ$ -ных магнитов параллельного переноса инжектируется в синхротрон по вертикали.

Применение микротрона в качестве инжектора в такой синхротрон предъявляет специфические требования к его параметрам. Для пуска в синхротрон принят многооборотный вариант инжекции (30 оборотов). Это позволяет осуществить инжекцию небольшим током ( $I_{\text{инж}} \sim 10 \text{ мА}$ ) за время  $\tau_{\text{инж}} \sim 0.5 \text{ мкс}$ , однако эмиттанс инжектируемого пучка не должен превышать  $\epsilon_{\text{н}} \leq 6 \cdot 10^{-3} \text{ см.рад}$ ;  $\epsilon_{\text{з}} \leq \pi \cdot 10^{-3} \text{ см.рад}$  при энергетическом разбросе  $\Delta E/E \sim 0,5\%$ . Частота циклов работы синхротрона  $1+10 \text{ Гц}$ .

Основное внимание при разработке микротрона было уделено созданию компактной конструкции, обеспечивающей высокую надежность, стабильность параметров и технологичность проведения регламентных профилактических работ. Поэтому в основу конструкции микротрона были заложены нетрадиционные решения. В магнитно-вакуумной системе, рис.1, отсутствует вакуумная камера, уплотняемая на полюсах, а вакуумный объем ускорителя образуется полюсами, обратным магнитопроводом и соединяющими их перемычками, закрывающими обмотки возбуждения. В отличие от конструкций, где эти перемычки выполняются из немагнитного материала и уплотняются тем или иным способом, в данном микротроне перемычки из того же ферромагнитного материала, что и полюса, являются едиными деталями с полюсами и частями обратного магнитопровода. При этом полюс вытачивается вместе с обратным магнитопроводом из единой заготовки, так что вся магнитно-вакуумная система микротрона уплотняется лишь одним металлическим уплотнением из индия. Обмотки возбуждения наматываются на съемную часть магнитопровода

и пропитываются эпоксидным компаундом под давлением, что обеспечивает хороший теплоотвод.

Часть магнитного потока замыкается вокруг обмоток возбуждения по перемычкам и насыщает их. Указанная часть магнитного потока добавляется к потоку в ярме и требует небольшого увеличения сечения обратного магнитопровода при сохранении ампервитков обмоток возбуждения.

Описываемая конструкция магнитной системы позволяет существенно расширить область поля с требуемой степенью однородности, определяющей диаметр последней орбиты и максимально приблизить ее к обратному магнитопроводу. Вопрос оптимизации топографии поля у края полюса является традиционным предметом исследований при создании магнитов различного типа, причем кроме классического способа применения для этой цели шим различной формы [2], размещенных на краю полюса, в последнее время для магнитов микротронов рассматривался способ формирования краевого поля с помощью радиальных выступов [3], частично продлевающих полюс в радиальном направлении над обмоткой при условии отсутствия насыщения материала.

В описываемой нами конструкции края полюсов с расположенными на них шимами продлены в радиальном направлении и замыкаются перемычками с обратным магнитопроводом. Части перемычек до шин утолщены, чтобы подвести к шимам магнитный поток без насыщения материала. За шимами перемычки образуют стенку вакуумной камеры, и толщина их выбрана из технологических соображений. Оптимизация краевого поля производилась путем вариации формы и положения шим, геометрии обмоток и сечения перемычек с учетом насыщения материала в них. Эта работа была произведена в 1988 году путем численных расчетов на ЭВМ "Одренок" по программе "Poisson", разработанной в ИЯФ СО АН<sup>\*</sup>). На рис.2 представлены результаты расчетов распределения поля вблизи края полюса для различной геометрии магнитной системы.

Для согласованного случая толщины перемычек, формы, положения шим и геометрии обмоток граница области однородного с точностью до 0,1% магнитного поля может быть доведена до расстояния  $0,83 h$  ( $h$  - межполюсный зазор) от обратного магнитопровода. Для компенсации радиального спада поля к центру полюса имеется корректирующий виток с током  $n_k I_k = 0,004 n_0 I_0$  ( $n_0 I_0$  - ток обмотки возбуждения). В результате проведенной оптимизации наружный диаметр магнита выбран равным 740 мм при диаметре 13-й орбиты  $D_{13} = 474 \text{ мм}$ .

Для проведения компромиссного выбора между энергией и эмиттансом

\* Авторы программы А.Н.Дубровин и Е.А.Симонов.

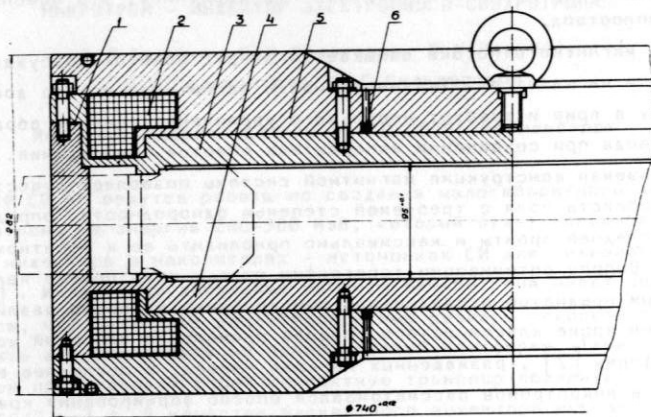
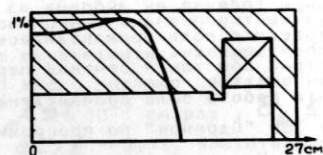
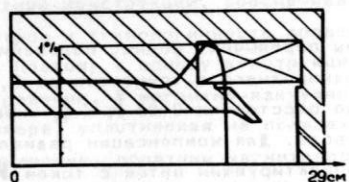


Рис.1. Магнитовакуумная система микротрона:

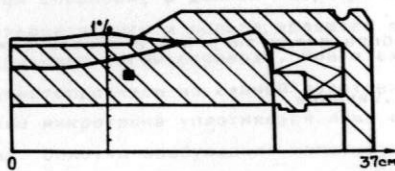
- 1 - вакуумное уплотнение; 2 - обмотка возбуждения;  
3 - полюс верхний; 4 - полюс нижний; 5 - ярмо магнитопровода; 6 - обмотка коррекции.



- Рис.2. Распределение магнитного поля вблизи края полюса для различной геометрии магнитопровода микротрона. Уменьшение радиального спада поля к центру полюса за счет использования корректирующей обмотки иллюстрируется верхней кривой геометрии с).



в)



с)

ускоренных электронов предполагается исследовать параметры пучка на трех последних орбитах при различных положениях резонатора относительно края полюса. Для этого предусмотрена возможность оперативного перемещения резонатора с помощью сильнофонного узла, обеспечивающего ход в пределах  $\sim 100$  мм. Для удобства проведения регламентных работ с резонатором предусмотрено его выдвижение из магнитного зазора вдоль главного диаметра орбит без снятия полюсов. Для этого части шим на азимуте резонатора делаются съемными и выдвигаются вместе с резонатором при отстыковке фланца, уплотняемого на вакуум индием. Фланец вакуумного волноводного окна, выполненного из керамики 22ХС, также уплотняется индием. Таким образом, вся вакуумная система микротрона выполняется по высоковакуумной технологии с использованием только металлических уплотнений и металлокерамических спаев и сварок, что должно повысить срок службы катодного узла и резонатора в целом. Откачка вакуумной системы производится встроенными магниторазрядными насосами, размещенными внутри системы. В микротроне используется подогревной борид - лантановый катод.

Высокочастотный тракт микротрона рассчитан на перестраиваемый магнетрон с мощностью импульса  $1,6+2,5$  МВт и включает в себя дистанционно управляемый фазовращатель, ферритовый вентиль, направленный ответвитель и вакуумное волноводное окно.

Система вывода пучка включает в себя ферромагнитный канал с компенсаторами искажения магнитного поля вблизи последней орбиты. Канал может дистанционно перемещаться вдоль оси в пределах 36 мм, чем обеспечивается возможность вывода пучка с последних орбит.

Низкая частота циклов работы синхротрона позволила разработать для описываемого микротрона компактный модулятор с полным разрядом накопительной емкости, питающейся от сети 50 Гц. Модулятор содержит две формирующие линии типа "Д", заряжаемые параллельно и разряжаемые последовательно тиратроном ТГ11-1000/25 через импульсный трансформатор на магнетрон. Запуск тиратрона производится тиристорным подмодулятором.

#### Литература

- [1] И.И.Авербух и др. "Электронный синхротрон-инжектор накопителей - источников СИ", Тезисы докладов XII Всесоюз. совещания по ускорителям заряженных частиц, М.: ИТЭФ, 1990, с.125.
- [2] С.П.Капица, В.Н.Мелехин. Микротрон, "Наука", М., 1969 г.
- [3] В.Н.Мелехин. ПТЭ № 2, 57, 1990 г.

## Экспериментальное определение зависимости фактора роста эмиттанса в канале ускорителя от яркости пучка

Данный эксперимент поставлен с целью выяснить, насколько соответствует яркость пучка из инжектора "жесткости" канала ускорителя, а также каковы причины роста эмиттанса. Взяв за основу оптимально согласованный режим с ускоренным током 70 мА, мы попытались, не меняя распределения фазовой плотности на входе, уменьшить ток пучка на несколько порядков величины и таким образом как бы "выключить" кулоновское поле пучка, играющее здесь существенную роль в формировании сгустков. Этот эксперимент соответствует численному эксперименту с "нулевым током". Для того, чтобы для каждого значения ускоренного тока иметь согласованный в первом приближении фазовый портрет, приходилось всякий раз снимать зависимость эмиттанса на выходе ускорителя от тока фокусирующей линзы и находить минимальный фактор роста эмиттанса.

Ослабление тока пучка проводилось с помощью стопки прозрачных сеток, которые вводились в пучок и вырезали около 30% частиц каждая. Постепенно увеличивая их количество, мы могли наблюдать качественные изменения фазового портрета на выходе ускорителя и снимать зависимость фактора роста фазового объема пучка от тока пучка. Тот факт, что введение сеток не меняет существенно распределения фазовой плотности на входе, необходимо было точно установить. Это было сделано с помощью соответствующих прямых измерений. Эффектов типа "муара" не наблюдалось для набора сеток в количестве до 7-8 штук.

На рис.5 представлена зависимость яркости пучка на входе и выходе ускорителя от тока пучка. Кривая, соответствующая входу, имеет в логарифмическом масштабе форму прямой с наклоном, равным единице. Кривая яркости на выходе лежит ниже и соответствует росту эмиттанса в 3.5-4.0 раза для тока пучка порядка 100 мА и в 1.8 - 2.0 раз для "нулевого тока". На рис.6 приведены поперечные фазовые портреты на выходе ускорителя для случаев, когда введена одна сетка (ослабление пучка - около 0.7) и когда вводилось 6 сеток (ослабление -  $0.7^6 \approx 0.12$ ).

### Основные результаты

В итоге нескольких циклов натурных и численных экспериментов удалось получить оптимальное согласование пучка с током 70 мА при удовлетворительном согласии измеренных и расчетных результатов. В эксперименте с сетками получена зависимость фактора роста эмиттанса пучка от его яркости. Зависимость носит монотонный характер. Рост эмиттанса для нулевого тока составил при этом около 2, а для 70 мА - около 4. Данные расчетов качественно согласуются с измерениями, т.е. заложенные в модели механизмы роста эмиттанса в определенной степени отвечают реальности.

## Литература

- [1] Жеребцов А.В., Мальцев А.П., Теляков В.А. Расчетные физические параметры ускоряюще-фокусирующего канала линейного ускорителя с ВЧК-фокусировкой - инжектора в бустер протонного синхротрона ИФВЭ. - Препринт ИФВЭ 90-29, Протвино, 1990.
- [2] Ю.А.Буданов, А.В.Козлов, А.П.Мальцев. Моделирование динамики частиц в линейном ускорителе ионов с использованием гауссовской параметризации распределения заряда в сгустке. В сб. Вопросы атомной науки и техники. Серия: техника физического эксперимента. Харьков, 1985, вып.3, 24

## СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ НА ЭНЕРГИЮ 50 МэВ

С. И. Бибко, В. Г. Вещеревич, В. Н. Волков, М. М. Карлинер,  
И. К. Седляров, А. Г. Трибендис, В. П. Яковлев

Институт ядерной физики СО АН СССР, Новосибирск

Институтом ядерной физики совместно с предприятиями электронной промышленности разрабатывается компактный накопитель электронов "Сибирь - СМ" - специализированный источник синхротронного излучения на энергию до 600 МэВ [1]. Рассматриваются несколько вариантов инжекторов для этого накопителя. Одним из таких вариантов является сверхпроводящий линейный ускоритель.

Главное преимущество сверхпроводящего линейного ускорителя по сравнению с обычным - ничтожно малые потери в сверхпроводящей ускоряющей структуре, что позволяет снизить мощность источника высокочастотного питания ускорителя и благодаря этому сделать его более компактным. Применение сверхпроводящих магнитов в накопителе "Сибирь-СМ", наличие на установке криогенного оборудования делают естественным использование и сверхпроводящего инжектора.

Импульсный режим работы линейного ускорителя ( $\tau = 10$  нс) дает возможность получить высокий темп ускорения, определяемый только критическим полем сверхпроводника и значительно превышающий величины темпа ускорения, достигаемые в традиционных сверхпроводящих резонаторах, которые работают в непрерывном режиме [2]. Дело в том, что тепловые процессы, ограничивающие предельные поля в сверхпроводящих резонаторах, перестают играть свою роль при короткоимпульсной работе с большой скважностью.

Ускоряющей структурой линейного ускорителя является круглый диафрагмированный волновод. Структура работает в режиме бегущей волны с рециркуляцией электромагнитной волны (рис.1). Рециркуляция применена для того, чтобы совместить относительно большую длительность импульса ВЧ-накачки с высокой групповой скоростью электромагнитной волны в ускоряющей структуре. Высокая групповая скорость нужна для уменьшения чувствительности структуры к неточностям размеров и для того, чтобы иметь достаточно большую апертуру. Благодаря отсутствию затухания в сверхпроводящей структуре ее размеры постоянны по всей ее длине.

Ускорение электронов производится в конце импульса накачки за счет энергии, запасенной в структуре (рис.2). Длительность импульса тока (20 нс) определяется условиями однооборотной инжекции в накопитель.

Связь с клистронным генератором осуществляется при помощи направленного ответвителя. Величина его переходного ослабления выбрана оптимальной (6,8 дБ), при этом энергия, поступающая в поглощающую нагрузку за время накачки структуры, минимальна, а в структуре запасается 78 % подводимой энергии. Ускоритель питается от клистрона, развивающего мощность 5 МВт с анодным напряжением 50кВ.

Волноводный тракт имеет сечение  $90 \times 45$  мм<sup>2</sup>. Основная часть тракта вакуумирована, газонаполненной является лишь часть тракта, примыкающая к генератору, содержащая ферритовый вентиль. Кольцо рециркуляции расположено вне криостата и изготовлено из латуни Л96, отрезки волноводов, находящиеся внутри криостата, - из стали 12Х18Н10Т с меднением внутри.

Ускоряющая структура изготавливается из нобия. Отдельные заготовки (кольца, вырезанные из бесшовных труб, и диафрагмы) после механической обработки и химической полировки соединяются электронно-лучевой сваркой, затем производится химполирование готовой секции (длинной 1 м). В состав секции входит трансформатор типа волны для связи с прямоугольным волноводом. Ускоритель состоит из двух таких секций, соединенных друг с другом посредством индеевого контакта. Наличие несверхпроводящего контакта в сверхпроводящей структуре допустимо: по оценкам, средние потери в контакте составляют менее 50 мВт. Примерно такие же потери во всей структуре (при добротности  $0,5 \times 10^6$ ). Это много меньше статических потерь криостата ( $\sim 2$  Вт). Поэтому же не требуется

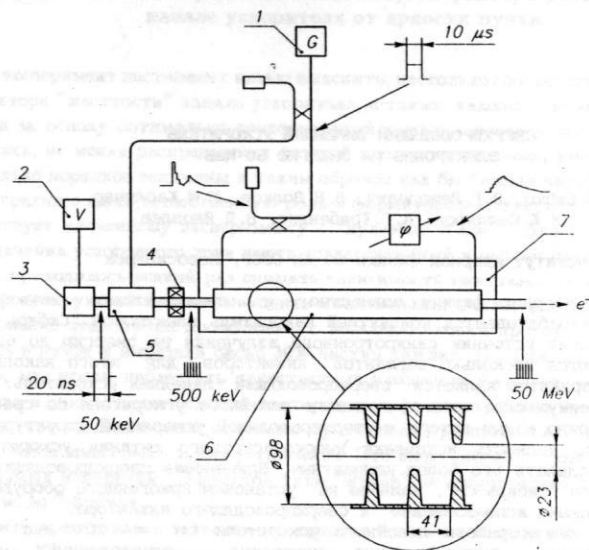


Рис. 1. Схема сверхпроводящего линейного ускорителя: 1 - клистронный генератор; 2 - источник питания пушки; 3 - триодная электронная пушка; 4 - магнитная фокусирующая линза; 5 - предускоритель-группирователь; 6 - сверхпроводящий ускоритель; 7 - криостат.

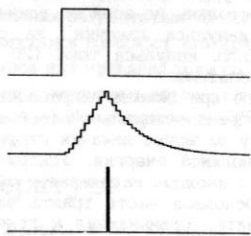


Рис. 2. Временные диаграммы мощности накачки, мощности электромагнитной волны в ускоряющей структуре, ускоренного электронного тока.

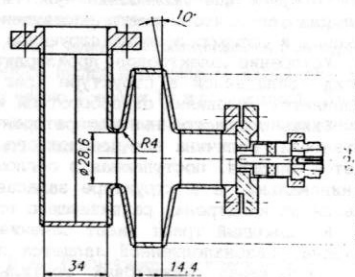


Рис. 3. Одиночный резонатор для импульсных испытаний.

понижения рабочей температуры ниже 4,2 К для повышения добротности.

Настройка структуры после изготовления производится путем индивидуальной деформации каждой рабочей ячейки на специальном стенде.

Источником электронов для линейного ускорителя является триодная пушка с напряжением 50 кВ [3]. Далее электронный пучок проходит через медный предускоритель-группирователь [4], приобретая энергию порядка 500 кэВ и группируясь в ступицу фазовой протяженностью около 30°. Для питания группирователя берется часть мощности (~ 200 кВт) от клистрона, питающего основную структуру.

В таблице 1 приведены параметры ускорителя.

В настоящее время завершено конструирование отдельных элементов и узлов линейного ускорителя. С целью отработки технологического цикла изготовлены короткие отрезки ускоряющей структуры.

Для проверки электрической прочности сверхпроводящих резонаторов в режиме коротких импульсов изготовлены одиночные резонаторы на частоту 2797 МГц (рис. 3). На низком уровне мощности добротность резонаторов составляет  $5 \times 10^7$  при  $T = 4,2$  К. Подготовлено проведение испытаний на высоком уровне мощности от клистрона КИУ-12. Достижение предельных полей в резонаторе определяется по возрастанию скорости испарения гелия и по отклонению от линейной зависимости мощности, излучаемой из резонатора после окончания импульса накачки, от падающей мощности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Анашин, В. С. Арбузов, Г. А. Блинов и др. Проект накопителя "Сибирь-СМ". - Препринт ИЯФ СО АН СССР 88-96. Новосибирск, 1988, 34 с.
2. I. E. Campisi, Z. D. Farkas. The pulsed RF superconductivity program at SLAC. - In: Proceedings of the Second Workshop on RF Superconductivity, Geneva, 1984, pt. 1, p. 107.
3. И. В. Шеболаев, Ю. Д. Черноусов, В. И. Попов. Наносекундный инжектор электронов. - ПТЭ, N 2, 1986, с. 29.
4. В. И. Иванников, Ю. Д. Черноусов, И. В. Шеболаев. Ускоряющая структура с параллельной связью. - ЖТФ, т. 56, в. 12, 1986, с. 2407.

Таблица 1

#### ПАРАМЕТРЫ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ

1. Энергия электронов на выходе -	50 МэВ
2. Энергия электронов на входе сверхпроводящей секции -	0,5 МэВ
3. Энергия электронов на входе группирователя -	50 кэВ
4. Ток электронов в импульсе -	30 мА
5. Длительность импульса тока -	20 нс
6. Частота повторения -	0,5 Гц
7. Рабочая частота ускоряющей структуры -	2450 МГц
8. Рабочая мода колебаний структуры -	$2\pi/3$
9. Относительная групповая скорость -	0,0075
10. Длина сверхпроводящей ускоряющей структуры -	2 м
11. Темп ускорения -	25 МэВ/м
12. Максимальное электрическое поле на поверхности -	40 МВ/м
13. СВЧ-энергия, запасенная в структуре -	35 Дж
14. Длительность импульса СВЧ-мощности -	10 мкс
15. Мощность СВЧ-клистрона в импульсе -	5 МВт
16. Число рециркуляций электромагнитной волны -	11
17. Переходное ослабление направленного ответвителя -	6,8 дБ
18. Рабочая температура сверхпроводящей структуры -	4,2 К
19. Суммарные тепловые потери в криостате -	2,5 Вт
20. Потребление жидкого гелия -	3,5 л/ч



## СИНХРОТРОН ДЛЯ ПРОТОННОЙ ТЕРАПИИ

Ю.Д.Вальев, В.Ф.Веремеенко, Р.Х.Галимов, О.А.Доманов,  
А.А.Литвинов, С.П.Петров, В.Г.Попов, В.С.Рубцов,  
В.П.Смирнов, В.П.Черепанов, Е.И.Шубин, А.В.Юргенсон

Институт ядерной физики СО АН СССР, Новосибирск

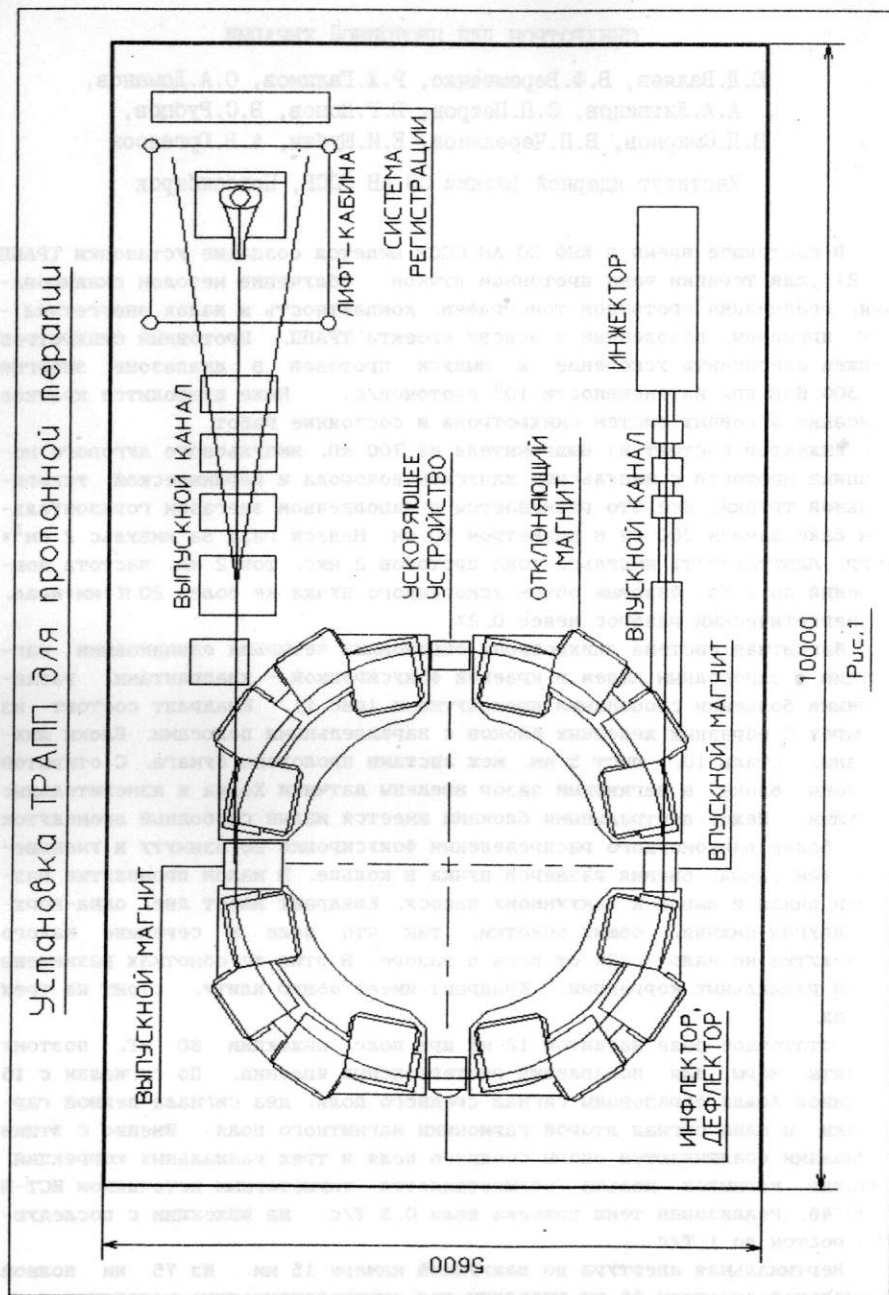
В настоящее время в ИЯФ СО АН СССР ведется создание установки ТРАПП [1-2] для терапии рака протонным пучком. Облучение методом сканирования, реализация протонной томографии, компактность и малая энергетика - вот принципы, положенные в основу проекта ТРАПП. Протонный синхротрон должен обеспечить ускорение и выпуск протонов в диапазоне энергий 70-300 МэВ при интенсивности  $10^9$  протонов/с. Ниже приводится краткое описание основных систем синхротрона и состояние работ.

Инжектор состоит из выпрямителя на 700 кВ, импульсного дугового источника протонов с импульсным напуском водорода и керамической ускорительной трубки. Все это размещается в заполненном элегазом горизонтальном баке длиной 200 см и диаметром 50 см. Напуск газа за импульс  $2 \text{ см}^3$  торр. Длительность импульса тока протонов 2 нкс, ток 2 мА, частота повторений до 1 Гц. Фазовый объем ускоренного пучка не более  $20 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ , а энергетический разброс менее 0.2%.

Магнитная система синхротрона образована четырьмя одинаковыми магнитами с однородным полем и краевой фокусировкой - квадрантами, разделенными большими свободными промежутками (рис. 1). Квадрант состоит из четырех С-образных железных блоков с параллельными полюсами. Блоки шихтованы, сталь 10, лист 5 мм, меж листами проложена бумага. С открытой стороны блока в магнитный зазор введены датчики Холла и измерительные катушки. Между центральными блоками имеется малый свободный промежуток для более равномерного распределения фокусировки по азимуту и уменьшения, тем самым, биения размеров пучка в кольце. В малом промежутке размещен пикап и вывод к вакуумному насосу. Квадрант имеет две, одна-верхняя, другая-нижняя, обших обмотки, так что поле в середине малого промежутка не мало - 20% от поля в зазоре. В этих же обмотках размещены витки радиальных коррекций. Квадрант имеет общую плиту, стоит на трех опорах.

Остаточное поле магнитов 12 мТ при поле инъекции 80 мТ, поэтому приняты меры для подавления гистерезисных явлений. По сигналам с 16 датчиков Холла образованы сигнал среднего поля, два сигнала первой гармоники и один сигнал второй гармоники магнитного поля. Именно с этими сигналами сравниваются опоры среднего поля и трех радиальных коррекций. Питание магнитов кольца осуществляется тиристорным источником ИСТ-Н 2500/48. Реализован темп подъема поля 0.5 Т/с на инъекции с последующим ростом до 1 Т/с

Вертикальная апертура по вакуумной камере 15 мм. Из 75 мм полной радиальной апертуры 45 мм выделены под синхробетатронные колебания и



30 мм - под выпуск-выпуск. Вакуум в кольце - около  $10^{-8}$  торр, время жизни на инжекции - 200 мс.

В таблице приведены основные параметры синхротрона ТРАПП:

энергия инжекции	0.7 МэВ
энергия выпуска	70-300 МэВ
периметр орбиты	1288.48 см
предельная частота	23283. кгц
эквивалентный радиус	205.06 см
число периодов	4
структура периода	L/2 B LS B L/2
длина свободного промежутка (L/LS)	76.5 / 10.0 см
угол поворота магнита	45°
магнитный радиус	150 см
магнитный краевой угол (внеш./внутр.)	11.25 / 13.8
магнитный градиент	0
поле инжекции	80.66 мТ
поле выпуска	0.82 - 1.8 Т
колебаний за оборот:	
по радиусу	0.793
по вертикали	0.893
радиальная $\beta$ -функция (min/max)	239 / 277 см
вертикальная $\beta$ -функция (min/max)	218 / 258 см
дисперсионная функция (min/max)	323 / 340 см
коэффициент расширения орбит	1.63
магнитный зазор	21 мм
зазор по вакуумной камере	15 мм
вертикальный адмитанс	14 $\mu$ мм*град
радиальная апертура (полная)	75 мм
апертура под синхробетатронные колебания	45 мм
радиальный адмитанс	14 $\mu$ мм*град

Схема инжекции: впускным каналом пучок транспортируется в медианную плоскость со смещением от равновесной орбиты на 40.5 мм и затем, через четверть оборота, при пересечении равновесной, радиальным ударом укладывается на орбиту. Напряжение на инфлекторе - 5,3 кВ.

Управление процессом ускорения осуществляет ЭВМ, рассылающая с частотой 50 Гц коды из 20 согласованных таблиц, в том числе коды поля и частоты. Дополнительное согласование поля и частоты осуществляется обратными связями по пучку - системой подавления фазовых колебаний и системой стабилизации радиуса. Планируется включение стабилизации двух первых и одной второй гармоник искажения орбиты по радиусу.

Ускоряющее устройство - нерезонансный широкополосный одновитковый трансформатор, шунтированный 100 Ом. Работа на первой гармонике частоты обращения - от 0.9 до 16 МГц. Максимальная амплитуда ускоряющего напряжения 150 В.

Схема выпуска: заброс рассеянием на внутренней мишени за нож электростатического дефлектора с последующим 20 мм радиальным забросом в вы-

пускной магнит. В дефлекторе – до 120 кВ на зазоре 5 мм, выпускном магните – до 1.5 Т. Расчетная эффективность выпуска в диапазоне 70-300 МэВ не хуже 50%.

К настоящему моменту осуществлен физический запуск синхротрона, реализован режим ускорения до проектной энергии 300 МэВ при интенсивности пучка  $1 \cdot 10^8$  протонов за цикл, опробован медленный выпуск пучка из камеры ускорителя.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Балакин В. Е., Валяев Ю. Д., Скринский А. Н., Смирнов В. П. Установка ТРАПП – терапия рака протонным пучком. Тезисы докладов 5-го Всесоюзного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве. Октябрь 22-24, 1985. Л., с. 152.
2. Balakin V. E., Skrinisky A. N., Smirnov V. P., Valyaev Yu. D. TRAPP - Facility for Proton Therapy of Cancer. EPAC, Rome, June 7-11, 1986. Vol. 2, p. 1505.

#### ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ СИСТЕМА ПРОТОННОГО СИНХРОТРОНА ТРАПП

Ю. Д. Валяев, В. С. Рубцов, В. П. Смирнов  
В. П. Черепанов, А. В. Юргенсон, В. И. Юхлин

Институт ядерной физики СО АН СССР, Новосибирск

В ИЯФ разработан и находится в состоянии физического запуска протонный синхротрон на энергию до 300 МэВ, предназначенный для терапии рака протонным пучком /1/. К настоящему времени реализовано ускорение пучка с числом частиц порядка  $1 \cdot 10^{11}$  до максимальной проектной энергии за время порядка двух секунд. Ниже описываются основные узлы системы формирования ускоряющего напряжения, метод и аппаратура сопряжения частоты ускоряющего напряжения с уровнем ведущего магнитного поля синхротрона, структура системы стабилизации радиального положения пучка.

Цепь формирования высокочастотного ускоряющего напряжения (см. рис. 1) включает управляемый напряжением генератор (ГУН А10), генератор фиксированной частоты стабилизированной кварцем (ГФЧ А1), управляемый напряжением аттенюатор (А2), балансный смеситель (А3), фильтр низкой частоты (А4), усилитель мощности (А5), амплитудный детектор (А8), ЦАП – формирователь уставки амплитуды ускоряющего напряжения (А9) и схему сравнения указанной уставки амплитуды с ее фактическим значением (А7). Цепь, включающая тот же ГУН (А10), второй ГФЧ (А11), смеситель (А12) и фильтр (А13), служит для формирования сигнала с частотой, отличающейся на 50 кГц от частоты ускоряющего напряжения. Этот сигнал используется в качестве гетеродина в системах регистрации положения, тока и фазы азимутально сгруппированного пучка.

ГУН (А10) выполнен в стандарте КАМАК. Под управлением внешнего ЦАП'а частота его меняется в диапазоне 49.2/34 МГц. Он оснащен внутренним ЦАП'ом – корректором дрейфа частоты. Балансные смесители (А3, А12) нагружены на неотражающие фильтры низкой частоты на базе фильтров Баттерворта 8-го порядка с частотами среза 20 МГц. Усилитель мощности (А5) состоит из восьми блоков широкополосных (до 50 МГц) усилителей, сигналы с выходов которых суммируются на трансформаторах типа "длинная линия". На ускоряющее устройство (А6) по двум кабелям 50 Ом поступает парафазный сигнал с амплитудой до 150 В. Ускоряющее устройство (УУ А6) представляет собой широкополосный одновитковый автотрансформатор с шунтирующей индуктивностью намагничения порядка 10 мкГн и шунтирующей активной нагрузкой 100 Ом, в которой и рассеивается подводимая мощность. Нижняя частота среза УУ уменьшена до 0.8 МГц за счет включения его в качестве элемента неотражающего фильтра на базе ФВЧ Баттерворта 8-го порядка.

В силу заметного релятивизма ускоренного пучка зависимость между полем и частотой существенно нелинейная. Нелинейна также зависимость частоты ГУН'а от управляющего напряжения. Кроме того, в соответствии с задачами установки, желателен такой способ сопряжения поля и частоты, который бы в наибольшей степени отвечал в принципе аperiodическому режиму управления энергией пучка. В силу указанных

соображений реализован способ сопряжения, при котором необходимая функциональная связь между уровнем ведущего магнитного поля и частотой ускоряющего напряжения определяется таблицами кодов двух ЦАП'ов (A1 и A2, рис.2) - формирователей гладких функций времени. Таблицы кодов формируются предварительно и хранятся в памяти ЭВМ. Единый внешний тактовый сигнал (50 Гц) синхронизирует эпюры выходных сигналов ЦАП'ов, при том что ЦАП'ы обслуживаются ЭВМ по необходимости асинхронно в интервалах между тактовыми импульсами. В указанные интервалы ЭВМ обслуживает также группу "традиционных" ЦАП'ов, управляющих магнитами коррекции основного поля. Некоторая асинхронность выходных сигналов ЦАП'ов в этом случае несущественна.

Гладкость выходных сигналов синхронных ЦАП'ов обеспечивается путем сплайн-интерполяции второго порядка. Таким образом, формируемые сигналы представляют собой сопряженные (в смысле непрерывной первой производной) кусочки парабол одинаковой длительности. Такого уровня гладкости, в случае управления с помощью ЦАП'а источником питания магнитной системы ускорителя, необходима (и достаточна) для того, чтобы иметь возможность реализовать максимальный темп изменения ведущего магнитного поля и при этом избежать ограничения сигналов в трактах управления током источника. Последнее необходимо для сохранения непрерывности управления величиной поля. В случае управления с помощью сплайн-ЦАП'а частотой задающего генератора системы, относительно высокая гладкость управляющего сигнала во всяком случае полезна с точки зрения чистоты спектральной линии ускоряющего напряжения.

Цепь формирования уровня ведущего магнитного поля (см. рис.2) включает сплайн-ЦАП (A1), схему сравнения уставки поля  $H$  с фактическим его значением  $\bar{H}$ , вырабатываемым системой датчиков Холла (A6), и источник стабилизированного тока питания магнитов (A5). Из-за существенной инерционности магнитной системы в динамике возникает некоторое расхождение между уставкой поля и его фактическим значением, в то время как инерционность установления частоты ГУН'а меньше на несколько порядков. Чтобы частота ГУН'а соответствовала фактическому значению поля, предусмотрена петля коррекции частоты по разности  $H-\bar{H}$ , включающая схему сравнения (A7) и управляемый ЭВМ аттенюатор (A8). В каждой фазе цикла подъема поля коэффициент передачи аттенюатора  $KH$  устанавливается таким, чтобы выполнялось соотношение

$$\frac{dF}{du} \cdot \frac{du}{dH} \cdot \frac{dH}{dF} \cdot KH = 1,$$

здесь  $dH/dF$  рассчитывается из релятивистской связи  $H$  и  $RF$ ,  $dF/du$  рассчитывается из нелинейной характеристики ГУН'а,  $A \cdot du/dH$  - известный коэффициент чувствительности датчиков Холла.

Предусмотрена также коррекция частоты ГУН'а (A3) сигналами обратной связи (ОС) по среднему радиальному смещению пучка и его фазе относительно ускоряющего напряжения. Петля ОС по радиальному смещению равновесной орбиты пучка относительно некоторого уставочного значения включает ЦАП (A13), формирующий уставку  $X$ , схему сравнения уставки с фактическим положением пучка  $\bar{X}$ , аттенюатор (A11), определяющий знак и величину коэффициента ОС и интегратор (A10), емкость которого размыкается после впуска пучка. Петля ОС по фазе пучка включает ЦАП (A16), формирующий значение фазы  $\Phi$ , предполагаемое равновесным на момент инжекции пучка, схему сравнения уставки фазы с ее фактическим

значением (A15) и аттенюатор (A14), определяющий знак и величину коэффициента ОС. Теория такого рода системы стабилизации радиального положения пучка изложена в работе /2/. Для поддержания оптимальных декрементов стабилизации необходимо обеспечить в цикле ускорения пучка выполнение соотношений

$$\frac{dF}{du} \cdot \frac{du}{d\phi} \cdot K\Phi \cdot \frac{1}{FS} = 1.73, \quad \frac{dF}{du} \cdot \frac{du}{dX} \cdot KX \cdot \frac{1}{2\pi \cdot FS \cdot \tau} \cdot \frac{\alpha \cdot R}{\eta \cdot RF} = 0.19.$$

Здесь  $dF/du$  - характеристика ГУН,  $du/dX$ ,  $du/d\phi$  - крутизны формирователей положения и фазы,  $KX$  и  $K\Phi$  - коэффициенты передачи аттенюаторов A11 и A14,  $FS$  - частота синхротронных колебаний (3.2/3.8 КГц),  $\tau$  - постоянная времени интегратора A10 (0.3 мс),  $\alpha$  - коэффициент расширения орбит (1.63),  $R$  - средний радиус орбиты (2051 мм),  $\eta = \alpha - 1/\gamma^2$  (6/1.0),  $RF$  - частота обращения (.8/16 МГц).

При достигнутой к настоящему времени интенсивности ускоряемого пучка  $1 \cdot 10^{11}$  протонов система стабилизации радиального положения пучка работает устойчиво. Ее эффективность даже при постоянных коэффициентах передачи  $KX$  и  $K\Phi$  такова, что петля коррекции частоты по дефекту поля, как оказалось, может не использоваться. Во всяком случае на описываемом этапе работы установившиеся потери пучка не могут быть отнесены на счет недостаточной эффективности используемой не в полной мере системы коррекции частоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балакин В.Е., Валяев Ю.Д., Скринский А.Н., Смирнов В.П. Установка ТРАПП - терапия рака протонным пучком. Тезисы докладов 5-го Всесоюзного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве. Октябрь 22-24, 1985, Л.: Изд.НИИЭФА, 1985, с.152.
2. Медведко А.С., Черепанов В.П., Шейнгейзихт А.А. Стабилизация радиального положения пучка протонов в синхротроне Б-5 в процессе ускорения. Труды Восьмого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Т.1, Дубна, 1983, с.179.

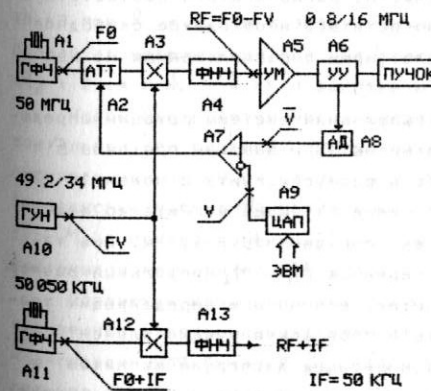


Рис. 1.

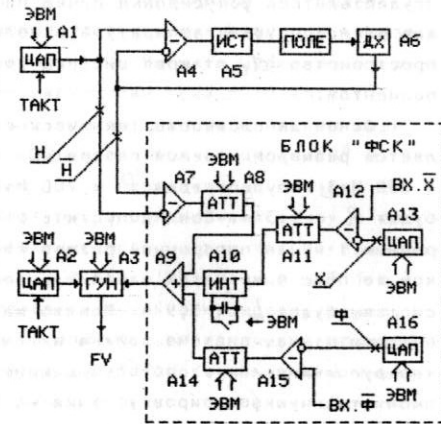


Рис. 2.

## МАЛОГАБАРИТНАЯ СИСТЕМА ГАНТРИ ДЛЯ ПРОТОННОЙ ТЕРАПИИ

В.Н.Марусов, В.Е.Пальчиков, С.Н.Рувинский, Г.И.Сильвестров,  
И.Г.Сильвестров, Э.М.Трахтенберг, А.Д.Чернякин

Институт ядерной физики СО АН СССР, Новосибирск

М.Ф.Ломанов, В.И.Лялевич, К.К.Оносовский, В.С.Хорошков

Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва

Создание крупных, оборудованных ускорителями протонов, центров для лучевой терапии, первый из которых построен в Лома-Линда [1], является основой для широкой реализации известных преимуществ применения протонов в медицинских целях. При этом достигнутый уровень лучевой терапии уже требует применения динамической техники облучения протонами, для чего перемещают не больного, а меняют направление пучка [2,3].

Для осуществления ротации протонного пучка вокруг мишени, расположенной на горизонтально направленной оси пучка, нужно произвести парой магнитов его параллельное смещение с оси на расстояние  $h$  (см. рис. 1) и третьим магнитом повернуть на  $90^\circ$  по направлению на мишень. Механическое вращение всей этой системы вокруг горизонтальной оси позволит проводить облучение мишени с любого направления в пределах  $360^\circ$ . Таким образом, трассировка пучка должна производиться тремя магнитами, параметры которых - радиусы и углы поворотов - определяют геометрию системы. Радиус  $90^\circ$ -градусного магнита  $R_m$  определяет ее поперечный размер  $h = R_m \cdot d$  где  $d$  - расстояние от торца магнита до мишени. На этой длине должна осуществляться фокусировка пучка на мишень, располагаться соответствующая регистрирующая аппаратура и должно остаться необходимое свободное пространство  $d_c$  от края системы до платформы с расположенным на ней пациентом.

Основная сложность технического выполнения системы ротации определяется размером и весом поворотных магнитов. При энергии протонов  $E = 230$  МэВ импульс равен  $P = 700$  МэВ/с и радиус магнита с полем 18 кЭ будет  $R = 1,3$  м. Если допустить расстояние от торца магнита до мишени равным 1 м, то поперечный размер системы составит  $h = 2,3$  м. При таком же поле в магнитах параллельного переноса  $M_1$  и  $M_2$  продольный размер системы будет  $L = 3,9$  м. Помимо магнитов, в основном определяющих траекторию пучка, система должна включать в себя фокусирующие элементы - квадрупольные линзы, обеспечивающие компенсацию дисперсии магнитов и окончательную фокусировку пучка на мишень, что приведет к соответствующему увеличению поперечного и продольного размеров системы.

При таких параметрах магнитов система ротации, получившая назва-

ние "гантри" (*gantry* - рама, платформа), с учетом требования ее прецизионного вращения представляет собой достаточно громоздкое и сложное инженерное сооружение. При этом к существенному усложнению приводит необходимость ротации пучка на  $360^\circ$  и облучения снизу, поскольку в этом случае требуется создание специального помещения с большим заглублением под консольно закрепленной платформой, на которой располагается пациент.

В работе приводится конструкция гантри, основанная на магните с радиусом  $R = 43$  см и полем 50-60 кЭ. На основе таких магнитов в ИЯФ СО АН СССР создается малогабаритный протонный синхротрон для терапевтических целей [4], в сочетании с которым и будет применяться подобная система ротации пучка (рис.2).

Магнит представляет собой одновитковую систему с увеличенной вертикальной апертурой  $A_z = 4$  см,  $A_r = 2$  см, в которых токовые шины запрессованы в магнитопровод из шихтованного железа, замыкающий обратный поток и воспринимающий расталкивающее шины усилие пондеромоторных сил магнитного поля  $H$ . Насыщение железа при полях выше 20 кЭ приводит к искажению топографии однородного магнитного поля, однако в пределах квадратной апертуры  $a_z = \pm 1$  см,  $a_r = \pm 1$  см поле сохраняет необходимую однородность  $\Delta H/H \leq 1\%$  вплоть до индукций в железе  $\geq 5$  Тесла. При поле 50 кЭ амплитуда импульса тока в шинах составляет 200 кА. Магнит запитывается через согласующий трансформатор с коэффициентом трансформации  $N = 20$  и током в первичной обмотке 10 кА, имеет водяное охлаждение и может работать на частоте 10 Гц.

Применение сильных полей в магнитах  $M_1$  и  $M_2$  неоправданно усложнило бы систему, поэтому рационально ограничиться в них полями не более 18 кЭ при  $R = 1,3$  м с эффективным использованием шихтованного железа. В этой геометрии угол поворота составляет  $55^\circ$ . Магниты имеют апертуру  $A_z = 2$  см и  $A_r = 4$  см и запитываются импульсами тока  $\approx 30$  кА.

Чтобы иметь возможность работать с пучком, направленным по горизонтальной оси системы, первый магнит  $M_1$  имеет угол поворота  $50^\circ$  и смещен с оси на 20 см, а на расстоянии 1.4 м перед ним располагается  $5^\circ$ -градусный магнит  $M_5$  увеличенной апертуры, забрасывающий пучок в апертуру  $M_1$ ; при выключенном  $M_5$  пучок проходит по оси. При такой геометрии системы размер гантри составляет  $h_{max} = 1,55$  м, продольный  $\approx 3,1$  м.

Параметры квадрупольных линз, обеспечивающих фокусировку пучка, выбирались из стремления получить достаточно малые значения огибающих и дисперсионной функций  $\beta_r$ ,  $\beta_z$  и  $\psi$  на длине  $90^\circ$ -ного магнита и минимальное значение дисперсии и размера пучка в фокусе системы на мишени. Эта задача решается двумя квадрупольными дублетами (между магнитами  $M_2$  и  $M_n$  и на выходе системы после  $90^\circ$ -ного поворота). При выбранных параметрах системы и рассматриваемом эмиттансе пучка его размер в фокусе

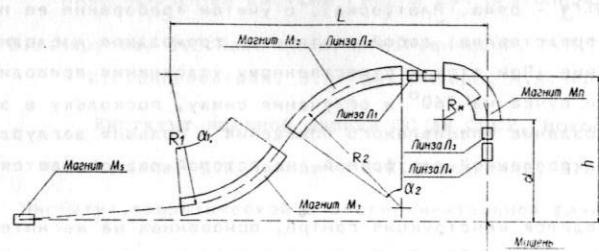


Рис.1. Структурная схема гантри.

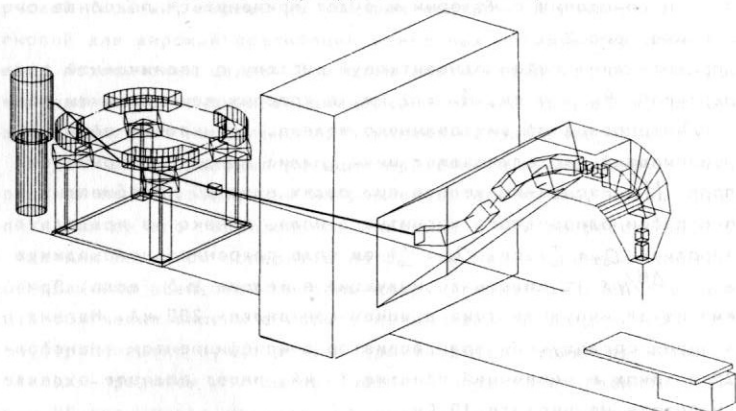


Рис.2. Протонный синхротрон с системой гантри.

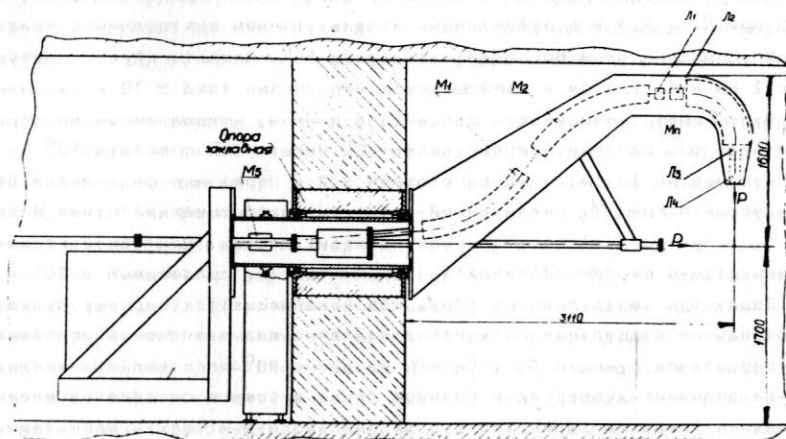


Рис.3. Конструктивная схема гантри.

составляет  $Q_1 = \pm 1.22$  мм,  $Q_2 = \pm 1.64$  мм. При необходимости диапазон изменений размеров пучка может быть существенно расширен вариацией параметров линз вплоть до смены их полярности.

Линзы представляют собой одновитковые импульсные системы, в которых поле формируется профилированными полюсами из шихтованного железа и скиновыми поверхностями токовых шин. Линзы имеют радиус апертуры  $r = 2$  см. При градиенте  $G = 7$  кЭ/см амплитуда импульса тока должна быть 23 кЭ.

Конструктивная схема гантри приведена на рис.3. Закладная опора в стене с двумя подшипниками с внутренним диаметром 400 мм разделяет систему на две части. Собственно гантри, расположенная в медицинском помещении, представляет собой консольную конструкцию с размещенными на ней магнитными элементами с регистрирующей аппаратурой. С другой стороны закладной опоры, за стеной, располагается закрепленный на вращающейся опоре шкаф питания, в котором размещены согласующие трансформаторы и вспомогательное электротехническое оборудование. Подвод тока к первичным обмоткам трансформаторов осуществляется гибкими кабелями, которые в процессе вращения гантри на угол  $\pm 180^\circ$  наматываются или сматываются со специального барабана. Таким образом подводятся и гибкие шланги водяного охлаждения к кабелю системы диагностики пучка и измерения параметров магнитных элементов.

Через все магнитные элементы проходит тонкостенная вакуумная камера из нержавеющей стали, закрытая герметичными титановыми окнами на выходе и входе системы. Автономная откачка вакуумной камеры осуществляется магниторазрядным насосом.

Измерение параметров пучка в системе осуществляется с помощью двухкоординатных сеточных пробников, токового трансформатора и пролетной ионизационной камеры с регистрацией на ЭВМ и с управлением системой питания магнитных элементов для автоматической регулировки параметров пучка по заданной программе, согласованной с режимом облучения пациента.

#### Литература

1. Cole F.T., Livdahl P.V., Mills F.E., Teng L.C. The Loma Linda University Medical Center Proton Therapy Accelerator. - In: Proc. of Int. Workshop on Proton and Narrow Proton Beam Therapy. Eds. E.Heikkinen and K.Kiviniitty. Oulu. June 8-10, 1989, p.103-105.
2. Pogorsak E.B. Dynamic Stereotactic Radiosurgery. - Ibid., p.67-71.
3. Koehler A.M. Preliminary Design Study for a Corkscrew Gantry. - In: Proc. 5th PTCOG Meeting and Int. Workshop on Biomedical Accelerators. Berkeley, LBL-22962. 1986, p.147-158.
4. Averbukh I.I. et al. Project of the Small-Dimensional 200 MeV Proton Synchrotron. - The 1st EPAC Conference, Rome, 1988, v.1, p.413.

## УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС СИНХРОТРОНА Б-5 РАДИЕВОГО ИНСТИТУТА

В.Г.Абдульманов, И.И.Авербух, В.Л.Ауслендер, Г.Б.Глаголев,  
Ю.М.Колокольников, Р.М.Лапик, А.Д.Панфилов, В.П.Томилов,  
А.Р.Фролов, В.П.Черепанов, В.Г.Ческидов, А.А.Шейнгезихт,  
В.П.Яковлев

Институт ядерной физики СО АН СССР, Новосибирск

А.Г.Доничкин, В.А.Столяров, Н.А.Тарасов,  
С.М.Трофименко, Г.А.Тутин, В.П.Эйсмонт

Радиевый институт им. В.Г.Хлопина, Ленинград

С 1987 г. Институтом ядерной физики совместно с Радиевым институтом осуществляются мероприятия по выводу ускорительного комплекса синхротрона Б-5 /1/ на рабочие параметры.

Длительная задержка запуска синхротрона, связанная с отставанием от графика строительных работ и готовности систем энергообеспечения и охлаждения в Радиевом институте привели к тому, что значительная часть систем комплекса потребовала существенной модернизации, ввиду морального и физического старения. Например, система АСУ комплекса полностью переведена на стандарт КАМАК с расширением ее функциональных возможностей.

Осуществлен перевод вакуумной системы синхротрона на откачку насосами ТМЧ-500. Улучшены параметры системы питания магнитов синхротрона. Повышена стабильность системы в диапазоне энергий до 130 МэВ.

Ряд доработок, проведенных на системе ВЧ-питания и ускоряющем резонаторе, позволили существенно повысить надежность ее работы. Была разработана и запущена система быстрого, с точностью  $10^{-3}$ , измерения частоты ВЧ-системы.

Значительные трудности вызваны тем, что все системы ускорителя находятся в общем вакуумном объеме. На корпусе резонатора и на обмотках подмагничивания схемы перестройки частоты высокое 3-5 кВ напряжение, что инициировало развитие вакуумных пробоев на близко расположенные торцы обмоток магнитов в полях рассеяния от торцов обмоток и обмоток подмагничивания. Установка замкнутых на корпус электростатических экранов на торцах магнитов, а также введение блокировки по низкому вакууму устранило возникновение таких пробоев.

Измерения орбиты на первом обороте, проведенные в 1987 г., показали значительное, до 25 мм, ее отклонение по радиусу от расчетной, вызванное существенным искажением краевых полей торцов обмоток в двух прямолинейных промежутках из-за близко, в 20 мм, расположенных ВЧ-резонатора в одном и пикап-станции в другом. Установка специальных электро-

магнитных экранов у торцов обмоток в других промежутках обеспечило коррекцию орбиты и ее положение по радиусу относительно расчетной находится в пределах  $\pm 0,5$  мм.

Ведется работа по оптимизации впуска-выпуска с одновременной модернизацией обеих систем. В процессе этой работы была уменьшена эффективная длина выпускного и впускного магнитов. У импульсного одновиткового выпускного магнита (рис.1а) укорочение было проведено с помощью медной рамки (3) (рис.1б), электрически и механически соединенной с внутренней шиной (4) с окном, равным апертуре магнита и длиной 55 мм. Минимальная толщина стенки рамки больше толщины скин-слоя не менее чем в 3 раза, что обеспечивает эффективную экранировку поля в апертуре рамки.

Значительной доработке подверглась схема питания дефлектора.

В 1988 г. на комплексе были начаты физические исследования.

В настоящее время комплекс работает в режиме ускорения протонов с параметрами.

Диапазон энергий от 10 до 120 МэВ. Интенсивность выпущенного пучка протонов до  $0,5 \cdot 10^{10}$  сек<sup>-1</sup> в диапазоне энергий 40-70 МэВ. Время выпуска пучка 100 мкс. Частота циклов ускорения 50 Гц. Рабочий вакуум  $2 \cdot 10^{-6}$  Торр. Время работы на эксперимент - 200+300 часов в месяц.

На электронно-лучевом источнике ИМИ-1/2 /, стоящем в отдельном зале, в 1987-88 г.г. велась отработка режимов электронно-оптической системы и режимов ионизации.

Были получены пучки многозарядных ионов  $C^{5+}$ ,  $O^{7+}$ . Велась эксперименты по ионизации титана, получены пучки ионов  $Ti^{12+}$ . Эффективность выпуска из ионной ловушки доведена до 0,5-0,6.

В течение сотни часов велась работа при частоте циклов ионизации 50 Гц.

При открытой ионной ловушке во времяпролетном режиме получен интегральный ток в ионном пучке  $> 30$  мкА.

Эксперименты по ионизации проводились с током электронного пучка от 0,4 до 0,7 А со средней плотностью  $j \sim 200-500$  А/см<sup>2</sup>, что далеко не исчерпало возможности установки.

В 1992 г. источник ИМИ-1 будет установлен на штатном месте в комплексе с новым форинжектором ИЛУ-9.

Как уже отмечено, конструктивное решение Б-5 не является оптимальным для ионной машины, т.к. наличие большой поверхности эпоксидного компаунда при его временной и радиационной деградации приводит к увеличению эффективной площади гашения из-за появления микротрещин. Предельный вакуум в настоящее время  $2 \cdot 10^{-6}$  Торр, вместо  $5 \cdot 10^{-7}$  в 1983 г. Даже резкое увеличение скорости внешней откачки не принесет существенно-го улучшения из-за ограничений проводимости. Использование в этих ус-

ловиях в качестве форинжектора ИЛУ-5 с энергией 1 МэВ/н для ионов с  $Z/A = 0,5$  привело бы к резкому снижению интенсивности из-за перезарядки на атомах остаточного газа на этапе инжекции и начальном участке ускорения ввиду его малого темпа.

Для решения задачи ускорения в Б-5 ионов с  $Z/A = 0,5$  разработан новый высокочастотный линейный ускоритель ИЛУ-9 на основе четвертьволновой экранированной двухпроводной линии на энергию 3 МэВ. В 1991 г ускоритель будет поставлен в Радиевый институт.

Для расширения функциональных возможностей ускорительного комплекса с форинжектором ИЛУ-9 разработана новая схема размещения комплекса (рис.2), по которой источник ИМИ-1 (1) и ускоритель ИЛУ-9 (2) размещаются в отдельном зале. Ускоритель ИЛУ-5 (10) остается на старом месте для работы с протонным пучком. Это повысит эффективность использования комплекса при проведении профилактических и ремонтных работ на установках ИМИ-1 и ИЛУ-9. В то же время возможна работа ИМИ-1 с ИЛУ-9 как автономного ускорительного комплекса.

С целью максимального использования ионного пучка ИМИ-1 при инжекции в Б-5 и увеличения интенсивности ускоренного пучка ионов разработана высокочастотная схема спирального накопления частиц при инжекции "Спироген".

Обычный (медленный) выпуск ионов из ловушки источника ИМИ-1 осуществляется за время  $\sim 100$  мкс. Поэтому разработана и изготовлена специальная дрейфовая структура, обеспечивающая быстрый, за 2+4 мкс, выпуск накопленных ионов из ловушки.

При однооборотной инжекции неизбежны потери ионного пучка, выпущенного из источника ИМИ-1, т.к. осуществление быстрого выпуска за время, меньшее 2 мкс, привело бы к неопределенному усложнению установки и снижению эксплуатационной надежности.

Ожидаемый эмиттанс ионного пучка из ИЛУ-9  $\epsilon = 1 \cdot 10^{-3}$  см.рад, и соотношение размеров ножа впускного магнита и области ускорения позволяет инжектировать частицы в течение порядка десяти оборотов.

Для тяжелых частиц применение бетатронного сердечника неприемлемо из-за значительных габаритов и мощной системы его питания.

Применение многооборотной инжекции по методу, основанному на линейно уменьшаемом по времени сдвиге равновесной орбиты к ножу септум-магнита /3/, может быть особенно эффективным, если нет ограничения по интегральному заряду ионного пучка и важно эффективное заполнение апертуры как по радиусу, так и по азимуту. Этот метод на Б-5 может быть эффективен при инжекции протонного пучка.

В ИМИ-1 число ионов, выпускаемых за импульс  $10^7$  при  $Z \approx 10$ , и их инжекция в Б-5 может быть обеспечена разработанной системой "Спироген" за время 2+4 мкс.

Пучок на выходе ВЧ-линейных ускорителей ИЛУ-5 и ИЛУ-9 разбит на короткие сгустки, длина которых менее 3 см, что дает возможность замедлять частицы с помощью пролетной трубки высокочастотным полем с частотой резонатора форинжектора. Частота обращения частиц в Б-5 при инжекции должна быть кратна частоте форинжектора с точностью  $\sim 1\%$ . Система спирального высокочастотного накопления "Спироген" (рис.2) состоит из нагруженного на пролетную трубку (12) ВЧ-усилителя (14), сигнал на который поступает через фазовращатель (15) от петли связи, помещенной в резонатор форинжектора на рис.1 ИЛУ-9 (2).

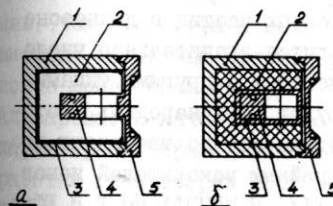


Рис.1. Конструктивная схема выпускного магнита:

а - в стационарной области; 1 - медный корпус; 2 - шихтованный магнитопровод; 3 - изоляция; 4 - внутренняя шина; 5 - наружная шина; б - в области экранировки поля в апертуре; 1 - медный корпус; 2 - изоляция; 3 - медная рамка; 4 - внутренняя шина; 5 - наружная шина.

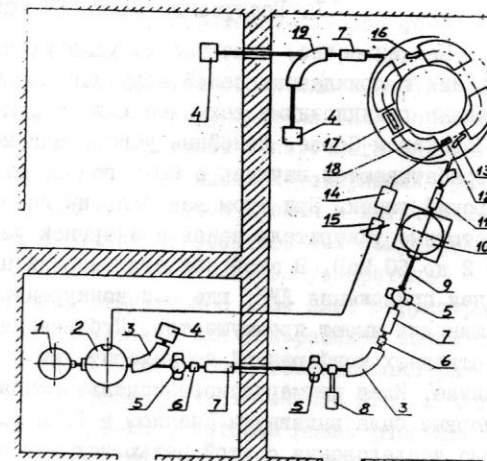


Рис.2. Схема ускорительного комплекса Б-5:

1 - источник ионов ИМИ-1; 2 - форинжектор ИЛУ-9; 3 - поворотный магнит; 4 - экспериментальный объем; 5 - насос; 6 - корректор; 7 - линза; 8 - телевизионный датчик; 9 - съемный участок канала; 10 - форинжектор ИЛУ-5; 11 - триплет; 12 - трубка пролетная; 13 - впускной магнит; 14 - ВЧ-усилитель (генератор); 15 - фазовращатель; 16 - выпускной магнит; 17 - ВЧ-резонатор; 18 - Б-5; 19 -  $90^\circ$  поворотный магнит.

#### Литература

1. В.Г.Абдульманов, В.Л.Ауслендер и др. Труды X Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий. Т.1, Серпухов, ИФВЭ, 1977.
2. В.Г.Абдульманов, В.Л.Ауслендер и др. Электронно-лучевой источник многозарядных ионов ИМИ-1. Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Т.2. ОИЯИ, Д9-89-52, Дубна, 1987.
3. Т.А.Всеволожская, Г.И.Сильвестров. Многооборотная инжекция и быстрый многооборотный выпуск частиц из синхротрона. Труды XI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Т.1, ОИЯИ, Д9-89-52, Дубна, 1989.



### ИНЖЕКЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ $\Phi$ - И В-ФАБРИК

В. Е. Балакин, А. Н. Ворошилов, Б. И. Гришанов, Н. С. Диканский, М. Е. Захваткин, П. М. Иванов, В. А. Киселёв, В. Я. Корчагин, Н. А. Кузнецов, В. А. Лебедев, С. И. Мишнев, А. В. Новохатский, И. Я. Протопопов, Ю. А. Пупков, А. Н. Скринский, Г. М. Тумайкин

Институт ядерной физики СО АН СССР, Новосибирск

В докладе представлен проект инжекционного комплекса (ИК) для сооружаемых в ИЯФ установок нового поколения со встречными электрон-позитронными пучками, имеющими энергию в системе центра масс 1 ГэВ ( $\Phi$ -фабрика) и до 14 ГэВ (В-фабрика).

Для реализации предельной светимости ( $L=10^{24} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ ) на этих установках инжекционный комплекс должен обеспечивать интенсивность ускоренных электронных и позитронных пучков свыше  $10^{10}$  частиц в секунду. Максимальная энергия ускоренных частиц для несимметричного варианта В-фабрики должна быть 8 ГэВ [1].

Общая схема комплекса ВЭПП-5, дающая представление об относительных размерах В и  $\Phi$ -фабрик и их расположении, изображена на рис. 1. Инжекционный комплекс размещается в подземной части существующего здания, примыкающего к кольцу ВЭПП-4М.

Функционально ИК подразделяется на три системы: форинжектор, накопитель-охладитель (НО) и основной линейный ускоритель (ОЛУ).

Структурная схема ИК приведена на рис. 2.

#### ФОРИНЖЕКТОР

Форинжектор состоит из двух расположенных рядом линейных ускорителей (рис. 2): электронного (ЭЛУ) на энергию 240 МэВ и электрон-позитронного (ЭПЛУ) на энергию 510 МэВ. Ускорители построены на структуре с бегущей волной и запитаны от промышленных клистронов на длине волны  $\lambda=10.7$  см. Ускорители работают с частотой 50 Гц и обеспечивают  $10^9$  позитронов и  $10^{10}$  электронов за импульс на энергии 510 МэВ.

Предусматривается следующая схема получения электронов и позитронов. После пушки пучок с энергией 200 кэВ ( $I=10 \text{ А}$ ,  $t=1 \text{ нсек}$ ) с помощью субгармонического группирователя бунчируется в короткий сгусток ( $2\sigma=6 \text{ нм}$ ). Ускоренные до 240 МэВ электроны после 180-градусного изохронного поворота фокусируются с помощью триплета квадрупольных линз на конвертер. Рожденные на конвертере позитроны с энергией  $E=2+20 \text{ МэВ}$  с помощью четвертьволнового преобразователя, выполненного в виде магнитного концентратора с адиабатически спадающим полем

( $N_{\text{max}}=50 \text{ кГц}$ ), приводятся на вход первой секции ЭПЛУ, погруженной в соленоидальное поле  $N=5 \text{ кГц}$ . Далее, вплоть до конечной энергии 510 МэВ, фокусировка пучка осуществляется квадрупольными линзами. Ожидаемый коэффициент конверсии - 2%.

После ускорения в ЭПЛУ позитроны будут иметь достаточно большой энергетический разброс  $\Delta E/E=\pm 3\%$ . Для уменьшения этого разброса, перед впуском в НО устанавливается монохроматор, состоящий из специальной поворотной-фокусирующей системы после которой сгусток удлиняется, причем появляется зависимость энергии частицы от её продольной координаты, и секции линейного ускорителя на 25 МэВ. Это позволит в 3 раза уменьшить энергетический разброс в пучке и обеспечить высокий коэффициент захвата в накопитель. В режиме ускорения электронов конвертер убирается и отключается участок структуры ЭПЛУ в 240 МэВ.

#### НАКОПИТЕЛЬ-ОХЛАДИТЕЛЬ

Электронный и позитронный пучки, ускоренные ЭПЛУ, захватываются поочередно в накопитель и охлаждаются в нем, уменьшая за счет радиационного трения свои поперечный и продольный фазовые объемы.

Полярность магнитного поля накопителя не меняется, электроны и позитроны инжектируются (и выпускаются) в противоположных промежутках и вращаются в накопителе в противоположных направлениях.

ТАБЛИЦА 1. Основные параметры накопителя

Энергия :	$E=510 \text{ МэВ}$
Периметр :	$P=2743.05 \text{ см}$
Ток пучка максимальный :	$I=35.5 \text{ нА}$ ( $N=2 \times 10^{10}$ )
Частота обращения :	$F_0=10.9258 \text{ МГц}$
Гармоника ВЧ :	$q=63$
Частота ВЧ :	$F_{\text{rf}}=699.25 \text{ МГц}$
Напряжение ВЧ :	$U_{\text{rf}}=800 \text{ кВ}$
Потеря энергии за оборот :	$\Delta U=5.9 \text{ кВ}$
Коэффициент уплотнения орбит :	$\alpha=0.027$
Адмиттансы :	$A_x=10; A_z=3 \text{ мрад/жс}$
Ширина сепаратрисы :	$\Delta E/E=2.4 \%$
Частоты бетатронных колебаний :	$Q_x=4.78; Q_z=2.86$
Хроматизм (без секступольных коррекций) :	$C_x=-7.66; C_z=-4.94$
Времена радиационного затухания :	$\tau_{z,x,s}=15; 10; 11 \text{ нсек}$
Энергетический разброс в пучке :	$\Delta E/E=0.051 \%$
Эмиттансы пучка :	$\epsilon_{x,z}=0.0023; 0.0005 \text{ мрад/жс}$
Продольный размер пучка :	$\sigma_{\parallel}=0.40 \text{ см}$

Выбор параметров магнитной структуры накопителя определялся требованием малости времен радиационного затухания и длины сгустка затухшего пучка. Последнее обстоятельство определило выбор достаточно высоких кратности ВЧ и напряжения на резонаторе.

Магнитная структура накопителя зеркально-симметрична относительно двух взаимно перпендикулярных осей, проходящих через центры коротких и длинных промежутков, и состоит из четырех квадрантов. Каждый квадрант содержит по два 45-градусных магнита с полем  $H=15.5 \text{ кГс}$  и градиентом  $G=-0.45 \text{ кГс/см}$  и семь квадрупольных линз с градиентом  $G=2 \text{ кГс/см}$ . Такое количество линз позволяет занулить дисперсионную функцию на промежутках и организовать на длинном промежутке набег фазы  $\delta Q_x=0.5$  для реализации накопления с предударом.

Для компенсации хроматизма предусмотрено по три секступольных линзы на элемент периодичности. Основная секступольная коррекция  $S_x$  закладывается в профиль квадрупольной линзы. Набег фазы бетатронных колебаний между секступолями, рабочая точка накопителя выбраны из условия обеспечения максимальной динамической апертуры накопителя.

Для впуска и выпуска частиц предполагается использовать 22-градусный септум-магнит с постоянным полем ( $H=8 \text{ кГс}$ ), смещенный по радиусу от равновесной орбиты (магнит типа Ламбертсона).

Инжектируемый пучок приводится септум-магнитом в медианную плоскость по вертикали; радиальные колебания пучка частично гасятся инфлектором, расположенным через  $1/4$  длины волны радиальных бетатронных колебаний от места впуска. Накопленный пучок в момент впуска ударом прединфлектора подводится к "ножу" септум-магнита, инфлектор гасит колебания накопленного пучка.

После накопления пучка в течение  $N$  тактов производится выпуск, занимающий время в 2 такта (40 мсек). Накопленный пучок с помощью локальной коррекции орбиты за время 10 мсек подводится на 2 мм к "ножу" септум-магнита и ударом прединфлектора (той же амплитуды, что и на впуске) забрасывается в апертуру септум-магнита, который выводит его по вертикали в выпускной канал.

Выведенные из  $HO$  сгустки могут впускаться в магнитную систему  $\Phi$ -фабрики, в ВЭПП-3 или ускоряться в основном линейном ускорителе.

Так как для ускорения в ОЛУ требуются сгустки длиной  $\sigma_w=0.04 \text{ см}$ , между накопителем и ОЛУ устанавливается группирователь, состоящий из ускоряющей секции ( $\lambda=10.7 \text{ см}$ ,  $E=15 \text{ МэВ}$ ) и поворотно-фокусирующей системы.

#### ОСНОВНОЙ ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ

В качестве ОЛУ предполагается использование ускорителя с высоким темпом ускорения, собранного из модулей, разрабатываемых в ИЯФ для проекта ВЭПП. ОЛУ предназначен для поочередного ускорения электронов и позитронов от энергии  $HO$  до максимальной энергии В-фабрики.

Линейный ускоритель состоит из 30 модулей. Каждый модуль длиной 5м состоит из 4-х ускоряющих секций, смонтированных на одной платформе и запитанных от одного клистрона. В промежутках между секциями расположены квадрупольные линзы, обеспечивающие фокусировку частиц.

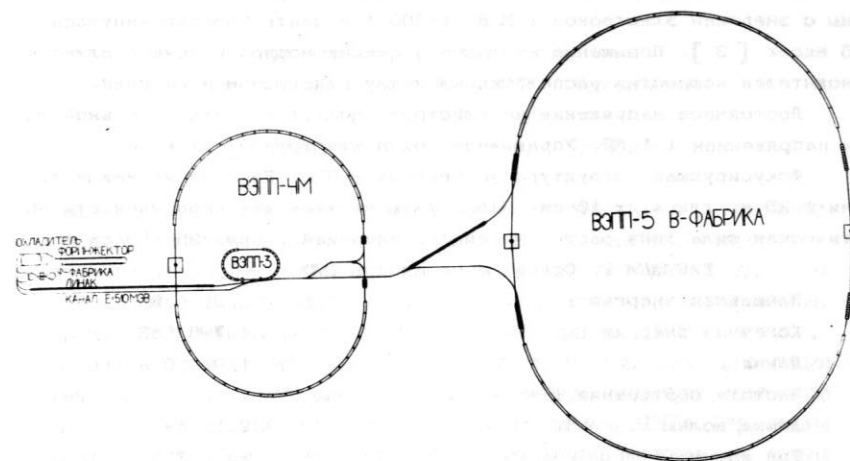


Рис. 1. Общая схема комплекса ВЭПП-5.

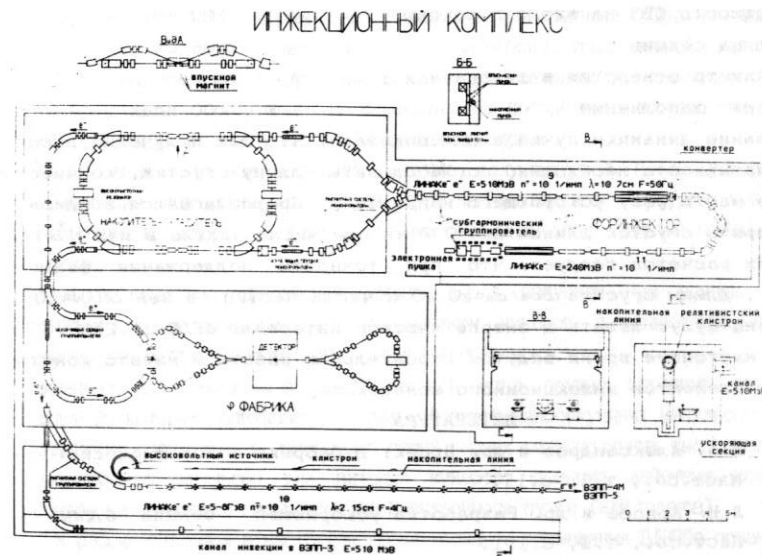


Рис. 2. Структурная схема инжекционного комплекса.

Ускоряющая структура на бегущей волне выполнена в виде круглого диафрагмированного волновода постоянного сечения [ 2 ].

Для генерации СВЧ-мощности используются релятивистские клистроны с энергией электронов 1 МэВ,  $I=300$  А и длительностью импульса 0.5 нсек [ 3 ]. Повышение входящей в секцию мощности осуществляется умножителем мощности, расположенным между клистроном и секцией.

Постоянное напряжение на клистроны подается с накопительной линией напряжением 1.1 МВ. Управление током клистронов сеточное.

Фокусирующая структура ускорителя -FODO. Расстояние между линзами 1.25 м, длина их 10 см. Набег фазы на элементе периодичности  $90^\circ$ . Оптическая сила линз растет линейно с энергией ( $\delta_{\max}=25$  кГц/см ).

ТАБЛИЦА 2. Основные параметры ОЛУ

Начальная энергия :	0.51 ГэВ
Конечная энергия :	4.7-8 ГэВ
Длина :	120-150 м
Частота повторения :	4 Гц
Длина волны :	2.15 см
Тип волны :	$2\pi / 3$
Количество модулей(клистронов) :	30
Количество ускоряющих секций в модуле :	4
Средняя мощность, потребляемая клистроном:	25 кВт
Средний темп ускорения :	85 МэВ/м
Мощность СВЧ на входе в секцию :	100 МВт
Длина секции :	106 см
Диаметр отверстия в диафрагмах :	6 мм
Время заполнения :	100 нсек

Исследование динамики пучка в ОЛУ показало, что для получения высокой монохроматичности необходимо согласовывать длину сгустка, количество частиц в нем и фазу ускоряющего напряжения. Предполагается в одном цикле ускорять сгусток длиной  $2\sigma_w=0.7$  мм при числе частиц в нем  $N^\pm=10^{10}$ .

Из расчетов следует, что при точности поддержания фазы ВЧ  $\delta F=\pm 0.5$  , длины сгустка  $\delta\sigma_w/\sigma_w=\pm 0.15$  и числа частиц в нем  $\delta N/N=\pm 0.1$  90% частиц будут лежать в энергетическом интервале  $\delta E/E=\pm 0.25\%$  .

В настоящее время ведутся строительные работы и начато конструирование элементов инжекционного комплекса.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А.А. Александров и др. Проект В-фабрики в Новосибирске. Наст.сб., т.1, с.15.
2. Л.Н. Арапов и др. Разработка ускоряющей секции ВЛЭПП. Наст.сб., т.1, с.191.
3. Л.Н. Арапов и др. Разработка высокочастотного источника ВЛЭПП. Наст.сб., т.2, с.30.

#### БЫСТРЫЙ ПОБАНЧЕВЫЙ ВЫПУСК ПРОТОНОВ ИЗ НАКОПИТЕЛЬНОГО КОЛЬЦА УНК ПРИ ЭНЕРГИИ 3 ТЭВ

Б.И.Гришанов, Г.И.Сильвестров  
Институт ядерной физики СО АН СССР, Новосибирск  
А.И.Дрождин, Ю.Г.Каршев  
Институт физики высоких энергий, Протвино

Совмещение в одном научном центре (ИФВЭ, Протвино) двух крупнейших ускорительных комплексов - протонного кольца УНК и линейного электрон-позитронного коллайдера ВЛЭПП открывает уникальные возможности для их совместного использования для постановки таких, например, экспериментов, как протон-электронные встречные пучки, ускорение в линаках ВЛЭППа  $\pi$ -мезонов, генерируемых выпущенным из УНК протонным пучком и т.д. Для организации подобных экспериментов необходимо согласовать временную структуру протонного пучка, выпущенного из УНК, и электронного пучка из линаков ВЛЭППа. Эта задача может быть решена путем осуществления побанчевого выпуска протонов из кольца УНК с частотой повторения 100 Гц, на которой будет работать комплекс ВЛЭПП, с последующим укорочением длины сгустков специальной системой группирователей - банчеров. При проектной частоте ВЧ-системы накопительного кольца УНК 200 МГц в нем будет накапливаться около  $1,3 \times 10^4$  сгустков длительностью около 1,5 нс с интервалами между их центрами 5 нс. Решение задачи выпуска отдельно каждого такого сгустка с частотой повторения 100 Гц на основе традиционной идеологии полноапертурных кикеров представляется сегодня технически невыполнимой. В работе представлены предложения по осуществлению побанчевого выпуска протонов из УНК, в основу которых положена следующая идеология.

1. Использование очень малого эмиттенса пучка, получающегося после ускорения, и применение размещенных на краю апертуры накопителя малоапертурных кикеров.
2. Организация промежутка с оптикой, оптимизированной под задачи побанчевого выпуска.
3. Локальное искажение равновесной орбиты перед выпуском при помощи самп-магнитов с целью заведения пучка в апертуру кикеров и подведения его к перегородке септум-магнита типа магнита Ламбертсона.
4. Применение работающих на встречной бегущей волне группы коротких кикеров, каждый из которых запитывается отдельной парой наносекундных импульсов.
5. Применение специального генератора серий парных разнополярных высоковольтных наносекундных импульсов для питания кикеров, принцип действия которого основан на развертке сильного точного электронного пучка (или пучков).

В рассматриваемом в настоящее время варианте размещения ВЛЭППа побанчевый выпуск удобно производить из 4-го промежутка УНК. В этом случае такой выпуск

хорошо согласуется с существующей схемой быстрого и медленного вывода из УНК. На участках, прилегающих к прямолинейному промежутку, дисперсия зануляется.

Исходными данными для расчета взяты следующие величины.

-Интервал между центрами сгустков протонов	нс	5
-Длительность сгустка	нс	1,5
-Акцептанс накопителя по X и по Z	мм*мрад	6,9
-Эмиттанс пучка при энергии 3 ТэВ	мм*мрад	0,0123
-Полуразмер пучка (при $\beta$ -функции 100 м)	мм	1,11
-Длина промежутка, занятая кикером	м	10
-Количество кикеров	шт	30
-Длина одного кикера	м	0,3
-Напряженность поля в кикере в бегущей волне	кВ/см	150
-Апертура кикера	см	0,6

Необходимость разбиения кикера на короткие секции с отдельной запиткой каждой из них задержанными по времени импульсами связана с требованием не возмущать сгустки, соседние с выпускаемым. Для кикера, работающего на бегущей волне, время нарастания удара равно сумме времени пролета частицей длины кикера и времени пробега волны в нем (при нулевой длительности фронта импульса в бегущей волне). Поэтому максимально допустимая длина одного кикера, определяющая вместе с длительностью фронта питающего импульса время нарастания удара, зависит от интервала между сгустками в накопителе и нестабильности синхронизации генераторов питания кикеров. Приемлемым можно считать удар со временем нарастания 2-3 нс и с плоской вершиной такой же длительности, спад удара может быть и большей длительности.

Таким образом, главной проблемой осуществления побанчевого выпуска по предлагаемой схеме является создание генератора, способного осуществить параллельную запитку нескольких десятков кикеров сдвинутыми по времени импульсами с наносекундными фронтами при наносекундной синхронизации, что не представляется возможным выполнить на основе традиционной техники с применением искровых разрядников. Однако применение малоапертурных кикеров, работающих на бегущей волне и требующих для запитки ток порядка одного килоампера, позволяет создать такой генератор на основе развертки сильноточного электронного пучка с энергией порядка 1 МэВ.

Схема генератора, работающего на этом принципе, приведена на рис.1. Ускоритель электронов формирует пучок с током 1 кА и частотой повторения 100 Гц. Приемниками пучка служат расположенные по окружности коллекторы, на которые пучок попадает после прохождения круговой развертки и пространства дрейфа. Генератор может быть построен и на основе линейной развертки. Каждый коллектор подсоединен ко входу передающей линии с волновым сопротивлением 50 Ом, согласованной с кикером. Процесс формирования импульса в линии поясняет

рис.2. Длительность плоской вершины импульса тока пучка электронов составляет 300 нс и равна суммарной длительности всех формируемых наносекундных импульсов, а период развертки выбирается равным (или несколько более) длительности импульса тока пучка по основанию (здесь 400 нс). В результате в каждой из линий формируется импульс отрицательной полярности с амплитудой 50 кВ в бегущей волне и с частотой повторения 100 Гц.

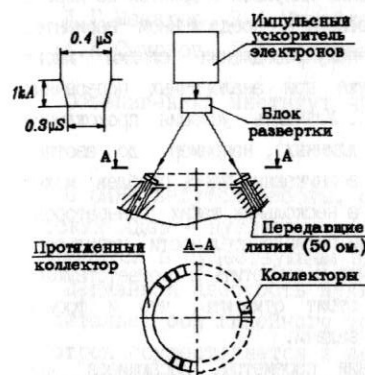


Рис.1. Схема генератора.

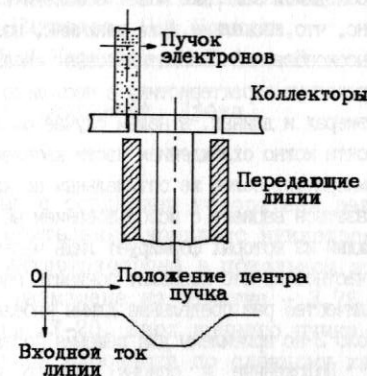


Рис.2. Формирование импульса в линии.

Длительность этих импульсов определяется временем прохождения следом пучка поперечного размера коллектора, а длительность фронта и спада - временем прохождения пучком края коллектора. Размер пучка на коллекторе должен быть меньше размера последнего. Во время нарастания и спада тока ускорителя пучок принимается заземленным протяженным коллектором.

На рис.3 приведена схема питания кикеров, выполненных в виде отрезков симметричных полосковых линий. Кикеры запитываются парами разнополярных импульсов, поэтому в разрыв каждой второй передающей линии включен инвертор, а число коллекторов вдвое больше числа кикеров. Согласование моментов прихода импульсов к соответствующим кикерам с моментом пролета сгустков через них осуществляется соответствующим выбором длин передающих линий и синхронизацией частоты и фазы развертки с частотой и фазой ускоряющего ВЧ-напряжения накопителя.

Энергия электронов в генераторе определяется комплексом соображений, связанных с формированием, проводкой, фокусировкой, разверткой и приемом на коллектор сильноточного пучка. Этот



Рис.3. Схема питания кикеров.

вопрос в настоящее время находится в стадии проработки, ожидается, что потребуется энергия 1-2 МэВ.

В предложенном варианте необходимо задерживать импульсы в линиях передачи на времена до 300 нс, что может привести к завалу фронта. По нашим измерениям в обычных условиях радиочастотный коаксиальный кабель РК50-44-17 при необходимой задержке может обеспечить прохождение импульса с фронтом не короче 2 нс, что несколько хуже величины, взятой за основу в предложенном варианте. (Высоковольтные полиэтиленовые кабели с полупроводящими слоями имеют переходную характеристику в несколько раз хуже при аналогичных поперечных размерах и длинах, в нашем случае около 10 нс). Улучшить условия прохождения фронта можно охлаждением части кабелей (самых длинных), например, до азотных температур. Более же оптимальным по комплексу возникающих здесь проблем может оказаться вариант с использованием не одного, а нескольких таких генераторов, каждый из которых формирует лишь часть из общей последовательности импульсов. В частности, это позволит понизить энергию пучка и сократить в соответствующее количество раз предельные длины кабелей, хотя стоит отметить, что и фронты около 2 нс приемлемы для решения поставленной задачи.

Положенные в основу данного предложения параметры, касающиеся как принципа и техники формирования наносекундных импульсов для питания кикеров, так и других элементов системы, основаны на достигнутом в ИЯФ и в ИФЭЭ уровне этих параметров или близком к достигнутому. ИЯФ СО АН СССР имеет опыт разработки и многолетней эксплуатации высоковольтных наносекундных устройств с фронтами порядка 1 нс при амплитудах до 50 кВ и до 150 кВ в системах инжекции, многократного накопления и выпуска частиц в ускорителях и накопителях, формирования сильноточных электронных пучков микросекундной длительности с токами в сотни ампер при энергии 1-2 МэВ в частотном режиме (ЭЛИТ-Л2), развертки мощных электронных пучков (в установках типа гирокон, магнискон). Это позволяет надеяться на реальность осуществления такого проекта.

#### Литература

1. Балбеков В.И. и др. Труды 12-й международной конференции по ускорителям частиц высоких энергий. - Батавия, 1983, с.40.
2. Балакин В.Е., Буджер А.М., Скринский А.Н. Возможность создания установки со встречными электрон-позитронными пучками сверхвысокой энергии. В сб. Проблемы физики высоких энергий и управляемого термоядерного синтеза, Наука, М., 1981. Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1978, М.: Наука, 1978.
3. Балакин В.Е., Скринский А.Н. Установка со встречными электрон-позитронными пучками сверхвысоких энергий (ВЛЭП). Труды ИКФА-2, 1980, с.31.

#### СП-ИНФЛЕКТОРНЫЙ СЕПТУМ-МАГНИТ НУКЛОТРОНА

П.Г.Акишин, В.Д.Бартенев, В.Н.Булдаковский, М.А.Воеводин,  
Е.И.Дьячков, И.Б.Иссинский, В.Д.Кравцов, Ю.В.Куликов,  
Л.Г.Макаров, В.А.Михайлов, П.И.Никитаев, С.А.Новиков,  
А.А.Смирнов, Г.Г.Ходжибагян, В.И.Черников, И.Н.Яловой

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В ОИЯИ ведутся работы, связанные с созданием ускорителя релятивистских ядер - нуклотрона <sup>1/1</sup>. Ускорительный комплекс нуклотрона размещается в существующем здании синхрофазотрона в цокольном этаже.

Медианная плоскость нуклотрона размещена на отметке - 3,76 м относительно оси линейного ускорителя ЛУ-20. Ввод ионного пучка в нуклотрон осуществляется в вертикальной плоскости по сложному каналу инжекции, состоящему из трех участков <sup>1/2</sup>, где происходит поворот пучка на углы 0,272 рад, 0,944 рад и 0,159 рад в дипольных и в СП инфлекторном магнитах, расположенных соответственно на 1, 2 и 3 участках канала.

СП-инфлекторный септум-магнит (ГИМ) нуклотрона предназначен для посадки ионного пучка на орбиту ускорителя. В магните ГИМ, расположенном в первой половине участка ввода нуклотрона, рис. 1, угол инжектируемого пучка, составляющий с медианной плоскостью ускорителя 0,159 рад после выхода из дипольного магнита М2 <sup>1/2</sup>, уменьшается до 0,012 рад.

Окончательная посадка пучка в медианную плоскость нуклотрона происходит в инфлекторных пластинах (ИП), расположенных во второй половине участка ввода ускорителя после структурной линзы ЦЛ.

#### Конструкция СП-инфлекторного септум-магнита

В сооружаемом СП-синхротроне релятивистских ядер - нуклотроне применены магниты с железным ярмом и обмоткой из трубчатого СП кабеля с охлаждением потоком двухфазного гелия <sup>1/3</sup>.

СП инфлекторный магнит - магнит септумного типа рис. 3 состоит из шихтованного магнитопровода, изготовленного из листов электротехнической стали марки Э 330-А толщиной 0,5 мм и сверхпроводящей многовитковой обмотки, экранированной магнитным септумом. Штампованные С-образные листы электротехнической стали имеют изоляционное покрытие

интеллектуальный детектор (ИД), позволяющий подключать к себе до 16 детекторов I-го уровня. В ИД планируется применение микропроцессора РК1816 с защитой в ШЗУ программой сбора и обработки данных с детекторов. ИД будет включать в себя программируемые таймеры, регистры ввода/вывода. Связь между ИД и ЭВМ будет осуществляться по последовательному каналу типа RS 232. Предполагается установить ИД на экспериментальных установках ИФВЭ. Такие ИД представляют собой по сути распределенные миниатюрные АСРК и будут иметь связь с автоматизированными системами управления экспериментальными установками, а также с центральной ЭВМ АСРК.

Модернизировать планируется и детекторы нейтронов и мюонов.

#### Л и т е р а т у р а

1. Барейша Ф.Ф. и др. Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ Д9-87-105, Дубна, 1987, т. II, с. 377.
2. Антипов А.В. и др. Труды XI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Д9-89-52, Дубна, 1989, т. II, с. 418.
3. Пелешко В.Н., Расцветалов Я.Н. Препринт ИФВЭ 87-66, Серпухов, 1987.
4. Белогорлов Е.А. и др. Препринт ИФВЭ 85-3, Серпухов, 1985.

#### АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА НЕПРЕРЫВНОГО РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ В ИЯФ СО АН СССР

О. М. Корябкин, А. В. Репков, В. Я. Чудаев

Институт ядерной физики СО АН СССР, Новосибирск

В течение ряда лет в ИЯФ СО АН СССР эксплуатировалась автоматизированная система радиационного мониторинга (АСРМ) на ускорительно-накопительном комплексе ВЭПП-3 / ВЭПП-4, структура и реализация которой описана в [1]. В Институте также имеются другие - и появляются новые - объекты, требующие проведения непрерывного радиационного контроля с помощью подобных систем. В последнее время была запущена в эксплуатацию система на комплексе ВЭПП-2М и готовится к запуску АСРМ на испытательных стендах ВЛЭПП.

Желание иметь оперативные сведения о радиационной обстановке в масштабе Института при весьма ограниченных людских ресурсах служб радиационной безопасности делает оправданным объединение систем радиационного контроля, обслуживающих функционально не связанные установки ИЯФ. Можно, таким образом, говорить о создании общеинститутской системы радиационного мониторинга, с помощью которой могла бы осуществляться централизованная обработка данных, предоставляемых отдельными системами. Дополнительными аргументами в пользу такого решения являются увеличение надежности сохранения информации и - при плотном размещении радиационно-опасных установок - возможность получения сведений о взаимовлиянии их радиационных полей (что обеспечивается, если централизованно собираются данные как о полях излучения, так и о режимах работы соответствующих установок).

Отметим, что создание общеинститутской системы может идти по пути простого наращивания ее масштабов. Для этого следует размещать детекторы во всех необходимых контрольных точках различных объектов Института и подключать их к одному центру с достаточно мощным процессором, организующим весь измерительный процесс. Недостатками такого подхода являются сложность коммуникаций, необходимость одновременной обработки разнородной информации и передачи больших ее потоков от центра в пультовые установки, где она может требоваться как для визуализации, так и для инициирования устройств, предотвращающих повышенное облучение персонала в аварийных ситуациях. При такой структуре системы нельзя не учитывать также возможность полной остановки контроля на всех объектах Института при определенных поломках аппаратуры, находящейся в центре (даже ее дублирование не решает полностью этой проблемы). Радиационный контроль на каждом объекте поэтому должен осуществляться автономной системой, хотя в реальных условиях вопрос о территории, обслуживаемой конкретной системой, может быть достаточно сложным.

В настоящее время наряду с созданием общеинститутской системы радиационного мониторинга осуществляется улучшение характеристик и расширение функциональных возможностей используемых в ней блоков.

## АППАРАТУРА СИСТЕМЫ

Измерительная часть системы, обслуживающей один радиационно-опасный объект, включает в себя блоки детектирования, расположенные на его территории, аппаратуру, регистрирующую сигналы блоков детектирования, и микро-ЭВМ, организующую измерительный процесс.

Каждый блок детектирования соединяется с регистрирующей аппаратурой с помощью одного индивидуального коаксиального кабеля, который служит для подключения блока к источнику питания и передачи информации. Такая - звездообразная - структура системы является, по нашему мнению, наиболее адекватной задаче создания систем радиационного контроля, особенно на установках, где пуско-наладочный режим работы занимает значительную часть времени. Соединение выносных детекторов кольцевой трассой может дать заметную экономию кабеля, однако затрудняет изменение конфигурации системы, диагностику неисправностей и делает возможной потерю информации с большого числа детекторов при локальном повреждении трассы.

ДЕТЕКТОР ФОТОННОГО И ЛИВНЕВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, применяемый в системе, представляет собой воздушную ионизационную камеру из полиамидной пластмассы с конструктивно совмещенным с ней электронным блоком, осуществляющим предварительную обработку ее сигнала.

Ток с ионизационной камеры поступает на преобразователь тока в частоту. Выходным сигналом преобразователя является последовательность импульсов со средней частотой, пропорциональной измеряемому току. Правильное измерение заряда сохраняется при импульсном характере регистрируемого тока до значений, достаточных для преобразования максимального заряда, который может поступить с ионизационной камеры.

Выбранный способ предварительной обработки сигнала в выносном детекторе удобен для дальнейшей обработки - оцифровка производится простым пересчетом регистрируемых импульсов в заданном интервале времени. Величина интервала может выбираться различной, в зависимости от требований к точности, динамическому диапазону, оперативности получения данных и возможностей по их обработке.

При разработке усовершенствованного блока предварительной обработки было учтено желание иметь следующие возможности:

- дистанционный контроль работоспособности ионизационной камеры,
- оперативное переключение диапазона измерения,
- контроль "нулевых" показаний детектора при наличии излучения.

Реализация этих функций блока предварительной обработки сигнала ионизационной камеры предполагает способность блока не только передавать информацию, но и принимать команды, передаваемые ему управляющей ЭВМ. Дешифратор команд, выполняющий эту роль, предварительно отделяет импульсы, кодирующие команду, от информационных, передаваемых самим детектором (оба типа посылок передаются по одному кабелю).

Для контроля работоспособности ионизационной камеры блоку посылается команда, по приеме которой напряжение питания камеры  $U_k$  увеличивается на величину, составляющую фиксированную часть от  $U_k$ . Результатом этого воздействия является регистрация заряда, пропорционального изменению напряжения и межэлектродной емкости камеры. По реакции блока

на эту команду, таким образом, можно судить об исправности практически всех устройств детектора, включая ионизационную камеру и источник ее питания.

Переключение диапазона измерения изменяет в 100 раз "вес" импульсов, передаваемых блоком на регистрацию. Наличие двух пределов измерения вполне перекрывает практические потребности.

Согласно выработанному ранее подходу, нулевому уровню излучения соответствует ненулевая частота, генерируемая блоком предварительной обработки. Соответствующий сдвиг "нуля", индивидуальный для каждого детектора, используется при обработке его показаний и хранится в файле описания системы. Периодически - один раз в несколько недель - их значение корректируется. Для проведения этой операции, очевидно, требуется отсутствие излучения в соответствующих контрольных точках (точнее, достаточно малое по сравнению с порогом чувствительности).

Для контроля смещения "нуля" детектора предусмотрена команда, после приема которой происходит отключение собирающего электрода ионизационной камеры от входа измерителя. Это дает возможность настраивать "нуль" детектора при наличии излучения.

В системе применяется также детектор нейтронного излучения активационного типа с замедлителем. Увеличение его функциональных возможностей по отношению к варианту, описанному в [1], на сегодняшний день не планируется, хотя определенная модернизация была проведена.

АППАРАТУРА РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛОВ ДЕТЕКТОРОВ. Выносные детекторы подключаются к регистрирующей аппаратуре с помощью блоков сопряжения; основные функции этих блоков - подача напряжения питания на соединительные кабели, выделение приходящих от детекторов сигналов для дальнейшей обработки и генерирование посылок, кодирующих команды, управляющие режимами работы блоков предварительной обработки.

Сигналы детекторов преобразуются в цифровую форму с помощью пересчетных устройств. К настоящему времени разработан усовершенствованный блок этого типа, содержащий 8 счетчиков длиной 24 разряда. Он включает в себя буфер, доступный для чтения, в который может переписываться содержимое всех каналов без остановки счета, что позволяет без потерь регистрировать импульсы, посылаемые детекторами. Предусмотрена возможность синхронного проведения этой операции во всех пересчетных устройствах, используемых в системе, что существенно упрощает работу с ними.

Необходимые для организации измерительного процесса временные интервалы задаются программируемым таймером, этот же блок предоставляет информацию об абсолютном времени.

Регистрирующая аппаратура выполнена в стандарте КАМАК. Объем имеющихся на сегодняшний день систем требует для размещения блоков по 2 крейта. В одном из них находится микро-ЭВМ, выполняющая также функции крейт-контроллера [2]. В этом же крейте находятся ОЗУ на 128К 24-разрядных слов и необходимые интерфейсные модули. В ОЗУ хранятся программы, применяемые в различных режимах работы системы, а также данные до их для пересылки в архив. Тем самым сводится к минимуму зависимость работоспособности системы от центральной ЭВМ (ЭВМ поддержки, ЦМ).

Микро-ЭВМ, организующая измерительный процесс в АСРМ, подключена в реализованной на сегодняшний день конфигурации системы к ЦМ наряду с другими ЭВМ, обслуживающими ускорительно-накопительный комплекс. ЦМ имеет винчестерский накопитель и обеспечивает начальную загрузку периферийных микро-ЭВМ, осуществляет файловую поддержку и межмашинный обмен [3].

Для организации общеинститутской системы радиационного контроля в помещении службы радиационной безопасности ИЯФ установлена ЦМ с аналогичными возможностями. Проложены соединительные трассы для информационного обмена с процессорами, обслуживающими АСРМ соответствующих установок. Опыт использования предоставляемой АСРМ информации позволяет считать желательным хранение подробных (с дискретизацией в 10 - 100 секунд) данных об уровнях излучения, регистрируемых во всех контрольных точках. Сохранять такую информацию необходимо в течение нескольких дней, для более длительных сроков достаточно данных о выделенных событиях, суточных дозах и дозах за отдельные этапы экспериментальных работ на установках.

Для связи между ЦМ и процессорами, организующими измерительные процессы в АСРМ различных объектов Института целесообразно применить интерфейс локальной сети, выполненный в виде КАМАК-модуля и предназначенный для работы с процессорами, имеющими сопряжение с КАМАК-магистралью [4]. Скорость передачи информации в последовательном дуплексном канале связи, организуемом с помощью этого интерфейса, достаточна для сбора данных о радиационной обстановке в Институте в реальном времени. Возможна, в частности, визуализация показаний детекторов интересующего объекта на дисплее ЦМ в темпе измерения. Кроме того, имеется возможность использовать этот канал связи для начальной загрузки периферийных микро-ЭВМ.

#### Л и т е р а т у р а

1. В. В. Каргальцев, О. М. Корябкин, Э. А. Купер, А. В. Репков. Автоматизированная система непрерывного радиационного контроля электрон-позитронного ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-4. Структура и реализация. Труды девятого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т. 2, Дубно, ОИЯИ, 1985, с. 314.
2. Г. С. Пискунов, С. В. Тарарышкин. Двадцатичетырехрядная ЭВМ в стандарте КАМАК. Автометрия, 1986, № 4, с. 32-38.
3. А. Н. Алешаев, В. Р. Козак. Программное обеспечение для микро-ЭВМ ОДРЕНОК. Препринт ИЯФ СО АН СССР 88-48. Новосибирск, 1988.
4. В. В. Каргальцев, А. В. Репков. Интерфейс локальной сети. Препринт ИЯФ СО АН СССР 88-104. Новосибирск, 1988.

## УСКОРИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ, КРУПНЫЕ УСКОРИТЕЛЬНЫЕ ПРОЕКТЫ

### Сессия 15