

B381.1
B.85

ТРУДЫ
ВСЕСОЮЗНОГО СОВЕЩАНИЯ
ПО УСКОРИТЕЛЯМ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

(Москва, 9—16 октября 1968 года).

Том I



МОСКВА 1970 г.

13. ИНТЕНСИВНЫЕ УСКОРИТЕЛИ ЭЛЕКТРОНОВ НА ЭНЕРГИИ 1-3 Мэв*

Е.А. Абрамян, В.А. Гапонов (Институт ядерной физики Сибирского
отделения АН СССР)

Сильноточные ускорители электронов на энергии 1-3 Мэв могут быть использованы не только для физических исследований, но и для многочисленных прикладных целей. Установки, генерирующие пучки с мощностями десятки киловатт, являются удобными источниками радиации для процессов радиационной химии, стерилизации медикаментов, консервирования продуктов и других технологических процессов, основанных на использовании излучения. Электронные пучки с плотностью энергии в десятки киловатт на см² позволяют вести плавку, сварку и другую обработку металлов. При энергии 0,5 Мэв и выше электроны могут быть выпущены из вакуумного объема, где происходит ускорение, и использованы в воздухе или среде инертного газа при атмосферном или более высоком давлении. В гамма - дефектоскопии интенсивные ускорители позволяют существенно уменьшить время экспозиции по сравнению с известными рентгеновскими аппаратами или даже перейти к визуальному контролю изделий.

Известно, что в ускорителях прямого действия, использующих в качестве высоковольтного генератора трансформатор, возможно ускорение заряженных частиц с к.п.д., близким к 100%. Широко распространены трансформаторы с изолированным ярмом (ИСТ), выпускаемые фирмой HVEC (США). В этих установках выпрямление ускоряющего напряжения осуществляется многими вентилями, установленными на секциях вторичной обмотки. Мощности, получаемые на ИСТ, достигают десятков квт.

Нами реализованы схемы ускорения электронов несколько более простой конструкции [1,2]. В качестве выпрямительного элемента используется сам пучок ускоренных электронов. Для этого у катода установлена управляющая сетка, напряжение на которой регулируется автоматически (рис. 1). Установка включается непосредственно в сеть 220/380 в, 50 гц и первичное напряжение U_1 прикладывается практически к двум элементам; индуктивности рассеяния L_S и ускорительной трубке. Собственная частота вторичного контура подбирается равной частоте питающего напряжения. Варьируя величину тока I во время прохождения его в трубке, можно поддерживать ускоряющее напряжение постоянным с заданной точностью. Для прикладных целей достаточна стабильность энергии 2-5%, однако система позволяет при необходимости обеспечить постоянство напряжения на трубке лучше 0,1%. Электронный ток в трубке идет не постоянно, а примерно $\frac{1}{3} - \frac{1}{5}$ общего времени. Такой

режим не является недостатком в радиационно-технологических процессах, но ускорительная трубка должна рассчитываться на ток, в пять раз превышающий средний.

Для удержания мощных пучков в шнуре малого диаметра внутри трубки установлена система постоянных магнитных линз. Такой способ позволяет удерживать ток более 100 га в диаметре менее 5 мм. Исследование систем сильной фокусировки электронов внутри трубки показало, что вполне реально ускорение в трубках обычных размеров токов ≥ 10 а, т.е. получение мощности пучка тысячи и десятки тысяч киловатт [3]. Трансформатор, передающий в трубку такую мощность, будет иметь габариты, незначительно отличающиеся от обычных электротехнических трансформаторов на указанные мощности.

В настоящее время нами созданы установки на энергии 1,5 и 2,5 Мэв со средней мощностью 15-30 квт. Схема конструкции ускорителя на 2,5 Мэв приведена на рис. 2. Внешне она напоминает ИСТ, однако конструкции вторичной обмотки и элементов магнитопровода решены иначе. Ускорительная трубка встроена внутрь центральной колонны трансформатора и имеет упругие электрические контакты для выравнивания напряжения. Основная высоковольтная изоляция - сж. гый газ. Секции вторичной обмотки пропитаны эпоксидной смолой и представляют собой монолитные механически прочные катушки.

Для уменьшения габаритов описываемых установок и улучшения условий работы вторичной обмотки трансформатора и других узлов нами разработаны модернизированные установки, одна из которых - на энергию 1 Мэв и мощность 25 квт - показана на рис. 3. Здесь элементы центральной колонны трансформатора выполнены

в виде конусов. В отличие от первоначальных конструкций между секциями колонны использована твердая изоляция. Вторичная обмотка состоит из отдельных секций; провод в каждой из них намотан в один слой по спирали. Благодаря этим усовершенствованиям уменьшился диаметр центральной колонны и всей установки и увеличилась продольная емкость вдоль вторичной обмотки, что существенно снизило перенапряжения при пробоях во время тренировок. Разработаны установки аналогичной конструкции на энергии 1,5 и 3 Мэв. Предполагается получить на них средние мощности пучков около 100 квт.

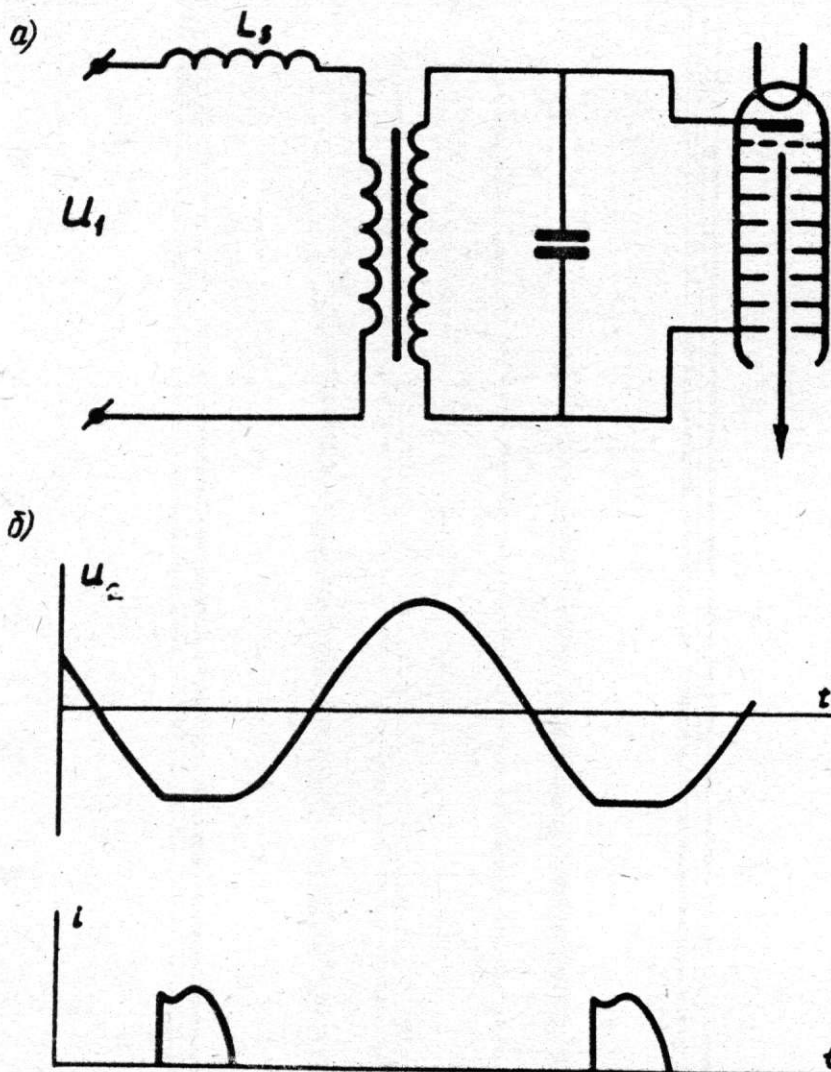


Рис. 1. а) электрическая схема ускорителя;
б) напряжение U_2 и ток i трубки как функции времени

Ускорительные трубки в различных вариантах имеют масляную откачку или встроенные магнитоэридные насосы. Последнее направление, на наш взгляд, более перспективно. В этом случае трубки могут быть отпаянными, как обычные лампы. Некоторые трудности вызывают системы выпуска пучка в атмосферу, так как они имеют ограниченный срок службы.

Существенное увеличение мощности в установках заданных габаритов может быть получено за счет перехода на частоты питания 400 гц и более. Предельные энергии могут достигать, как и в других ускорителях прямого действия, 10 Мэв и более, для увеличения мощности, как уже указывалось выше, пока нет принципиальных ограничений. Об ускорении протонов на аналогичных установках будет рассказано в другом докладе, представленном на настоящее совещание.

Основные наши усилия в области разработки ускорителей - трансформаторов направлены на упрощение конструкции и технологии, уменьшение габаритов, увеличение энергии и мощности, создание более надежных и простых в обслуживании систем.

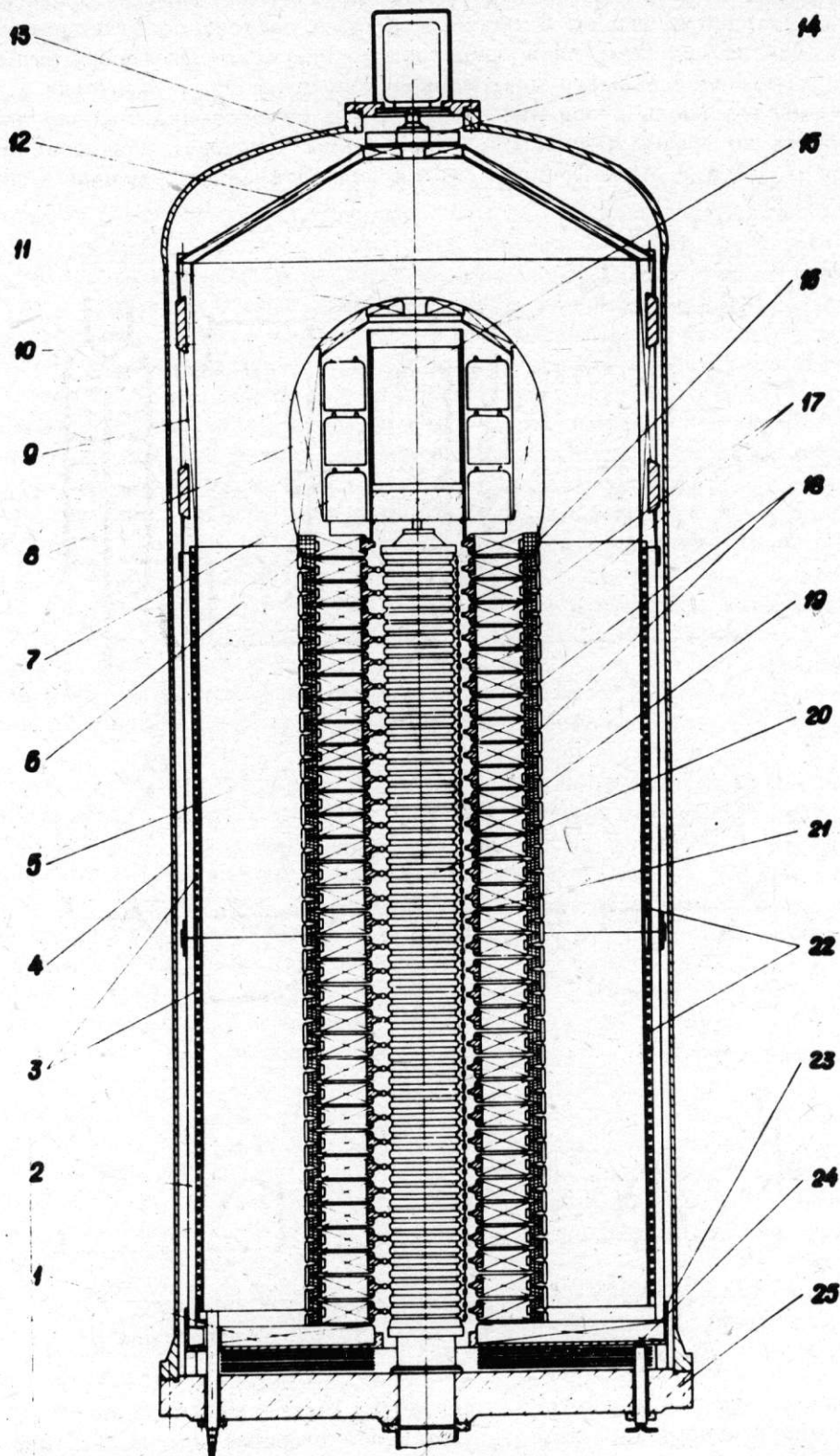


Рис. 2. Схема конструкции ускорителя на 2,5 Мэв; 1 - основание магнитопровода; 2 - граненый магнитопровод; 3 - первичная обмотка; 4 - котел; 5 - упругий прижим; 6 - катушка головки; 7 - батарея конденсаторов; 8 - головка; 9 - цилиндрический магнитопровод; 10 - съемная часть головки; 11 - крышка головки; 12 - конусный магнитопровод; 13 - крышка конусного магнитопровода; 14 - вентилятор; 15 - система управления инжектора; 16 - экран катушки головки; 17 - диск центральной колонны магнитопровода; 18 - секция вторичной обмотки; 19 - экран; 20 - ускорительная трубка; 21 - омический делитель; 22 - медный цилиндр; 23 - бандажное кольцо; 24 - радиатор; 25 - нижняя крышка котла

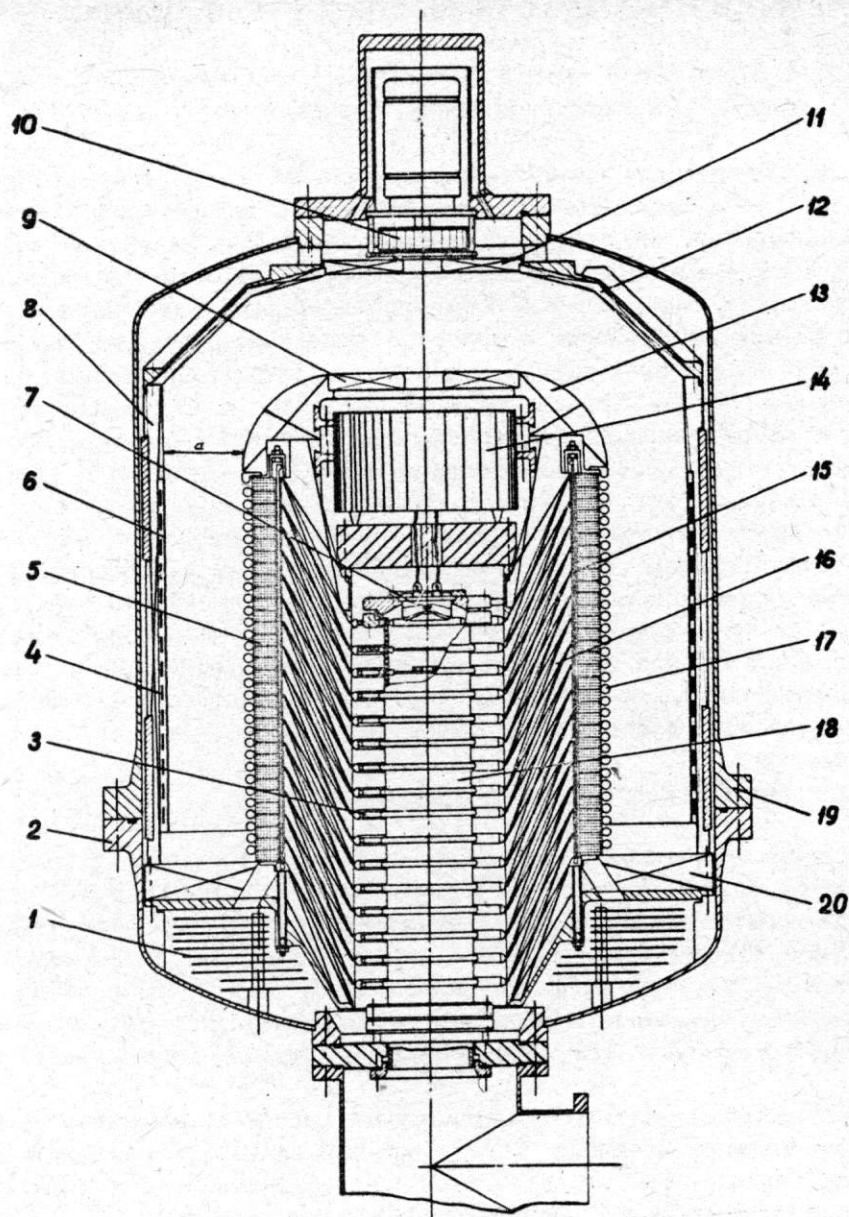


Рис. 3. Конструкция ускорителя на 1 Мэв: 1 - газоохладитель; 2 - днище котла; 3 - упругий прижим; 4 - первичная обмотка; 5 - вторичная обмотка; 6 - цилиндр медный разрезной; 7 - инжектор; 8 - кольцевой магнитопровод; 9 - крышка; 10 - вентилятор; 11 - крышка магнитопровода; 12 - головка; 13 - конусный магнитопровод; 14 - система управления инжектором; 15 - изоляционная лента; 16 - секция центрального керна; 17 - эквипотенциальные экраны; 18 - ускорительная трубка; 19 - котел; 20 - магнитопровод

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамян Е.А., Гапонов В.А. Источник ускоренных частиц одинаковой энергии, авторское свидетельство № 208144, бюл. № 3 (1968).

2. Абрамян Е.А., Гапонов В.А. Сильноточный ускоритель на основе трансформатора, Атомная энергия, 20, 5, (1966).

3. Абрамян Е.А. и др. Электронные пучки высокой интенсивности в ускорительных трубках с жесткой фокусировкой, Атомная энергия (в печати).

41. СТАБИЛИЗАТОР ТОКА ЭЛЕКТРОМАГНИТА НАКОПИТЕЛЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ *

М.М. Карлинер, Б.В. Левичев, А.С. Медведко
(Институт ядерной физики СО АН СССР)

Для проведения большинства экспериментов на установке со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-2 [1] необходимо, чтобы нестабильность постоянного магнитного поля на накопительной дорожке была не больше $\Delta H/H = (2 \div 3) \cdot 10^{-4}$. В связи с этим возникла задача стабилизации тока, создающего магнитное поле, с такой же точностью. Величина тока в процессе работы может устанавливаться любой в пределах от 1 ка до 7 ка. Питание электромагнита осуществляется от электромашинного генератора постоянного тока типа ГП-5000, напряжение которого регулируется путем изменения тока возбуждения,

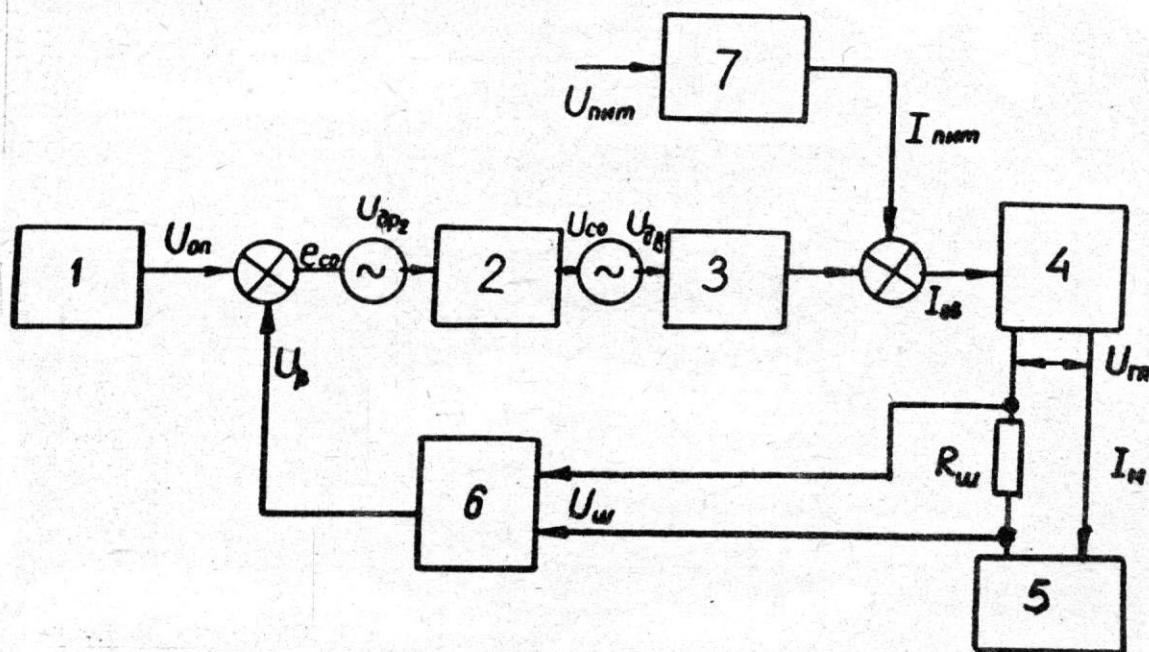


Рис. 1. Блок-схема стабилизатора: 1 - источник опорного напряжения, 2 - усилитель сигнала ошибки, 3 - устройство управления током обмотки возбуждения, 4 - электромашинный генератор, 5 - электромагнит, 6 - потенциометр-датчик типа Р-317, 7 - источник питания обмотки возбуждения, $R_{ш}$ - измерительный шунт

На рис. 1 показана блок-схема стабилизатора. Стабилизируемый ток измеряется с помощью шунта ($R_{ш} = 1,2 \cdot 10^{-3}$ ом) в цепи электромагнита. Падение напряжения на шунте при помощи потенциометра-датчика (6) делится и сравнивается с величиной опорного напряжения $R_{оп}$. Получающийся после сравнения разностный сигнал (сигнал ошибки $U_{ош}$) усиливается усилителем (2) и через устройство управления (3) воздействует на ток в обмотке возбуждения генератора (4).

В качестве источника опорного напряжения применен двухкаскадный стабилизатор напряжения на кремниевых стабилитронах [2] с термостатированным выходным каскадом, дающий напряжение около 1,2 в с нестабильностью не более $\pm 3 \cdot 10^{-5}$.

Усилитель сигнала ошибки для уменьшения дрейфа выполнен по схеме с модуляцией - демодуляцией. Модуляция сигнала осуществляется диодным мостовым преобразователем, выполненным по двухтактной схеме (рис. 2). Диодные мосты поочередно подключают трансформатор к источнику сигнала с переменной полярности. Модулятор [3] обладает коэффициентом преобразования, близким к 1 и низким уровнем паразитного напряжения гармоник коммутирующего напряжения на выходе (напряжение 1-й гармоники $U_{ост 1} = 5 \div 8$ мкв, напряжение 2-й гармоники $U_{ост 2} = 10 \div 15$ мкв). Дрейф нуля преобразователя не превышает $10 \div 15$ мкв/град в диапазоне температур от $+15^\circ\text{C}$ до $+50^\circ\text{C}$. Преобразователь термостатирован с $\Delta t = \pm 1^\circ\text{C}$. Частота модуляции 5000 гц.

5158

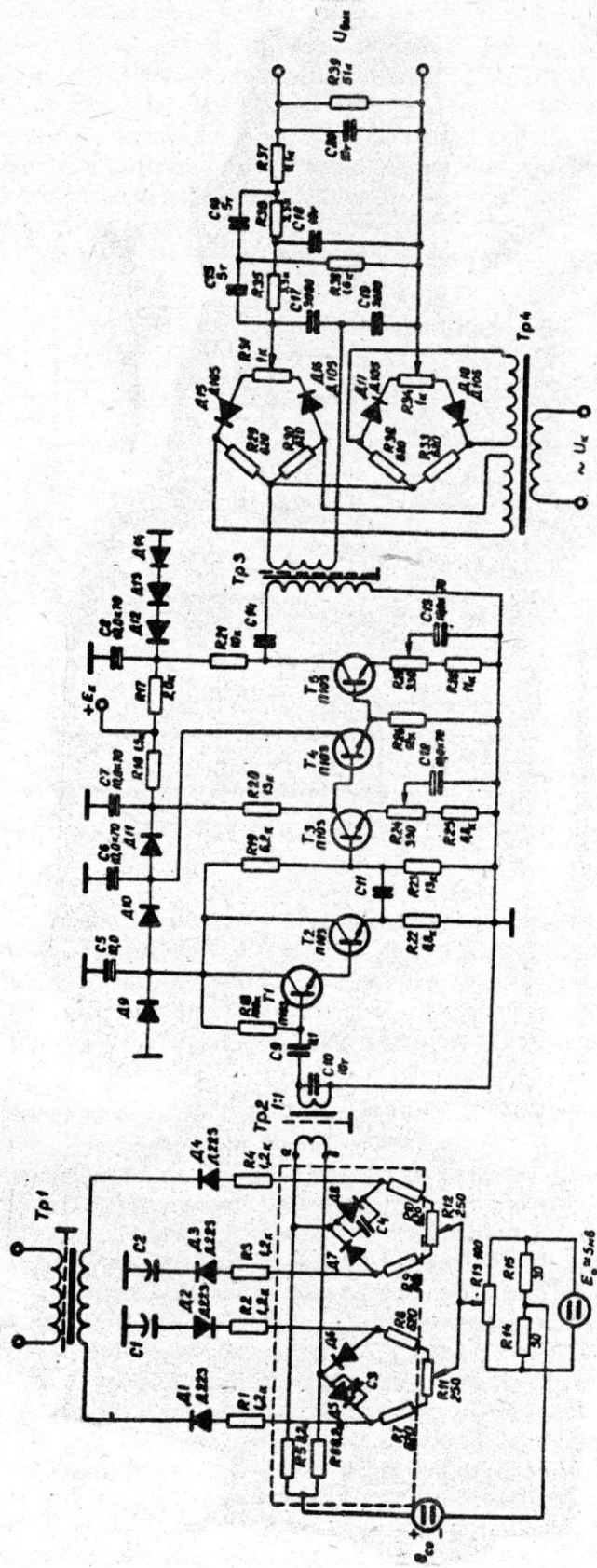


Рис. 2. Схема усилителя сигнала ошибки

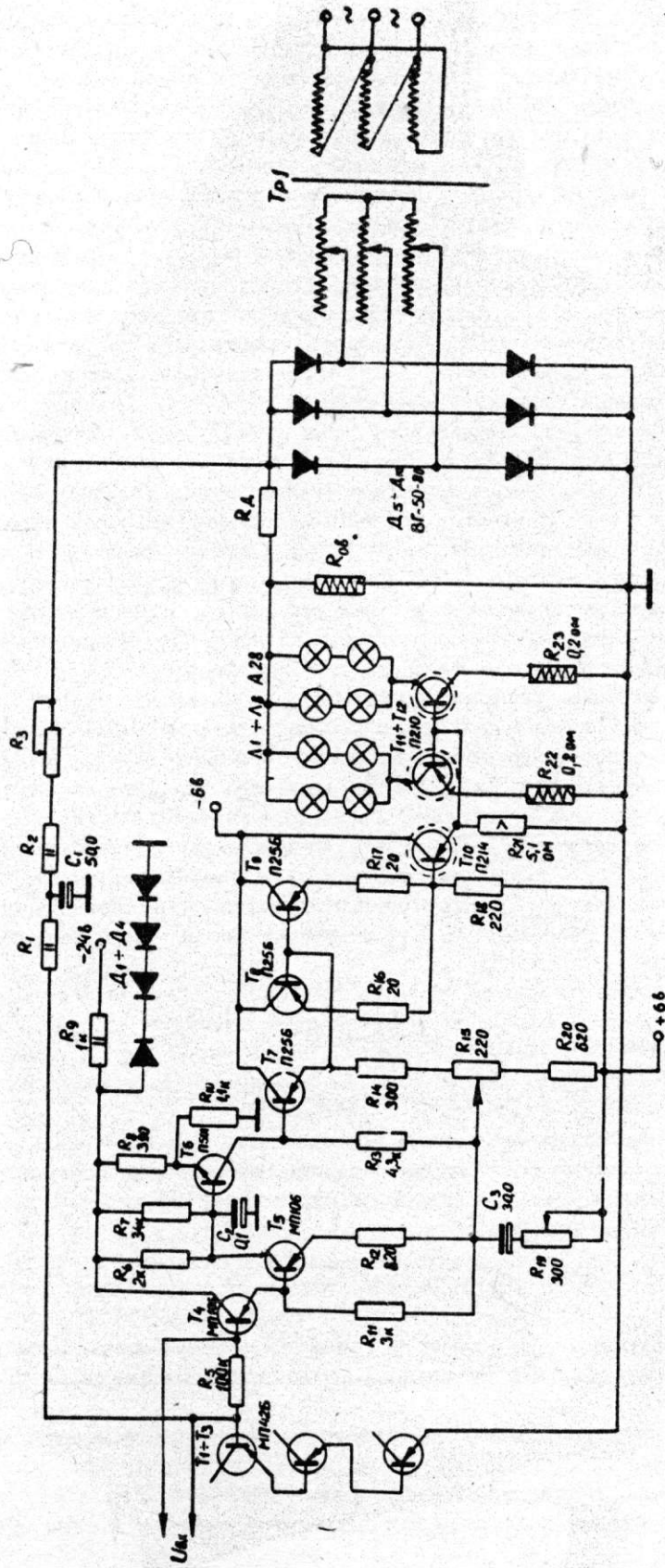


Рис. 3. Схема устройства управления током обмотки возбуждения

Напряжение с выхода трансформатора Тр2, настроенного в резонанс на частоту коммутации ($f_0 = 5$ кгц, $Q \approx 2,5$), поступает на высокоомный эмиттерный повторитель ($T_1 \div T_2$) и затем на усилительную секцию с гальванической межкаскадной связью ($T_3 \div T_5$). Коэффициент усиления секции в рабочем диапазоне частот достигает 10^4 и регулируется потенциометрами R_{24} и R_{27} .

Демодуляция усиленного напряжения осуществляется при помощи синхронного детектора, выполненного по схеме удвоения. В качестве управляемых ключей использованы два моста, состоящие из диодов $D_{15} \div D_{18}$ и сопротивлений $R_{29} \div R_{34}$. Сопротивления R_{31} и R_{34} используются для балансировки мостов. Дрейф "нуля" демодулятора мал благодаря применению в нем кремниевых диодов. Пульсации выходного напряжения сглаживаются фильтром, состоящим из конденсаторов $C_{15} \div C_{20}$ и сопротивлений $R_{35} \div R_{39}$. Граничная частота усилителя сигнала ошибки равна 600 гц.

Устройство управления током обмотки возбуждения (рис. 3) включает в себя шестифазный выпрямитель на германиевых вентилях $D_5 \div D_{10}$ и транзисторный усилитель постоянного тока. Напряжение выпрямителя регулируется при помощи трехфазного автотрансформатора Тр1 и подается через добавочное сопротивление R_d на обмотку возбуждения генератора ($R_{об}$). Сопротивление R_d включено для увеличения эффективности работы транзисторов $T_{11} \div T_{12}$, подключенных параллельно $R_{об}$ через нелинейные балластные сопротивления (лампы $L_1 \div L_8$). Транзисторы являются выходным каскадом усилителя постоянного тока (УПТ), УПТ включает в себя также составной эмиттерный повторитель ($T_8 \div T_{10}$) и схему предварительного усиления напряжения ($T_4 \div T_7$). Схема представляет собой двухкаскадный усилитель с коэффициентом усиления $K = 15 \div 18$, охваченный последовательной отрицательной обратной связью до получения усиления $K_{св} = 1,5 \div 2$. Сигнал обратной связи подается на вход с движка потенциометра R_{15} . Такое построение усилителя позволяет получить входное сопротивление схемы около 200 ком. Цепь отрицательной обратной связи шунтирована конденсатором C_3 и потенциометром R_{19} . Изменением их параметров устраняется неустойчивость системы стабилизации.

Нелинейная цепь, состоящая из транзисторов $T_1 \div T_3$ и сопротивлений $R_1 \div R_3$, служит для вывода рабочей точки регулирующих транзисторов T_{11}, T_{12} на середину линейного участка их амплитудной характеристики при изменении в несколько раз напряжения на выходе источника питания обмотки возбуждения. Регулировкой сопротивления R_3 можно добиться такого режима, когда относительный диапазон регулирования тока не зависит от величины этого тока. Динамический диапазон выходного каскада регулятора $\Delta I_{об}/I_{об} = \pm 15\%$ при токе магнита до 7 ка. Сужение динамического диапазона регулирования не отражается на точности стабилизации, однако дает возможность отказаться от ненадежного и малоэффективного тиратронного управляемого выпрямителя [4].

Испытание стабилизатора показало, что при петлевом усилении $K_{\Sigma} = 500$ и $K_{\Sigma} = 1000$ нестабильность тока магнита не превышает величины $\Delta I_M/I_M = \pm 2 \cdot 10^{-4}$ за шесть часов работы. Выход системы "на режим" после установки максимального рабочего тока составляет 30 минут. Дрейф тока за это время не превышает $\Delta I_M/I_M = \pm 5 \cdot 10^{-4}$.

Электронные блоки стабилизатора можно использовать без переделок для стабилизации выходного тока сравнительно менее мощных генераторов постоянного тока. Для этого необходимо подключать выходные транзисторы УПТ параллельно добавочному сопротивлению, а не обмотке возбуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Н. Скринский. Разработка и запуск установок со встречными электрон-электронными и позитрон-электронными пучками. Кандидатская диссертация, Новосибирск, 1964.
2. С.Д. Додик. Полупроводниковые стабилизаторы постоянного напряжения и тока, М., Сов. радио, 1962.
3. М.М. Карлинер, А.С. Медведко. Автометрия, 1968, № 6, стр. 67.
4. Устройство стабилизации тока с тиратронным выпрямителем типа БТ-4, Инструкция по эксплуатации.

42. ГЕНЕРАТОР ИМПУЛЬСОВ ТОКА С АМПЛИТУДОЙ 10^6 а
И СТАБИЛЬНОСТЬЮ $\pm 10^{-3}$ ПРИ ЧАСТОТЕ ПОВТОРЕНИЯ
2 гц *

Б.Ф. Баянов, А.В. Ильин, В.Н. Пакин, А.П. Панов, Г.И. Сильвестров
(Институт ядерной физики СО АН СССР)

Получение сильных магнитных полей, а также использование импульсных систем в ускорительной технике часто приводит к задаче создания мощных генераторов, работающих на индуктивную нагрузку. Кроме того, условия эксперимента иногда накладывают ограничения на длительность и форму импульса тока, стабильность амплитуды тока, а также требуют большой надежности в работе.

В настоящем докладе рассмотрен созданный в ИЯФ СО АН СССР генератор, обеспечивающий на индуктивной нагрузке 0,1 мкГн однополярный импульс тока синусоидальной формы, длительностью по основанию 1,2 мсек, амплитуда которого равна 10^6 ампера и стабильна с точностью $\pm 0,1\%$ при частоте повторения в несколько герц.

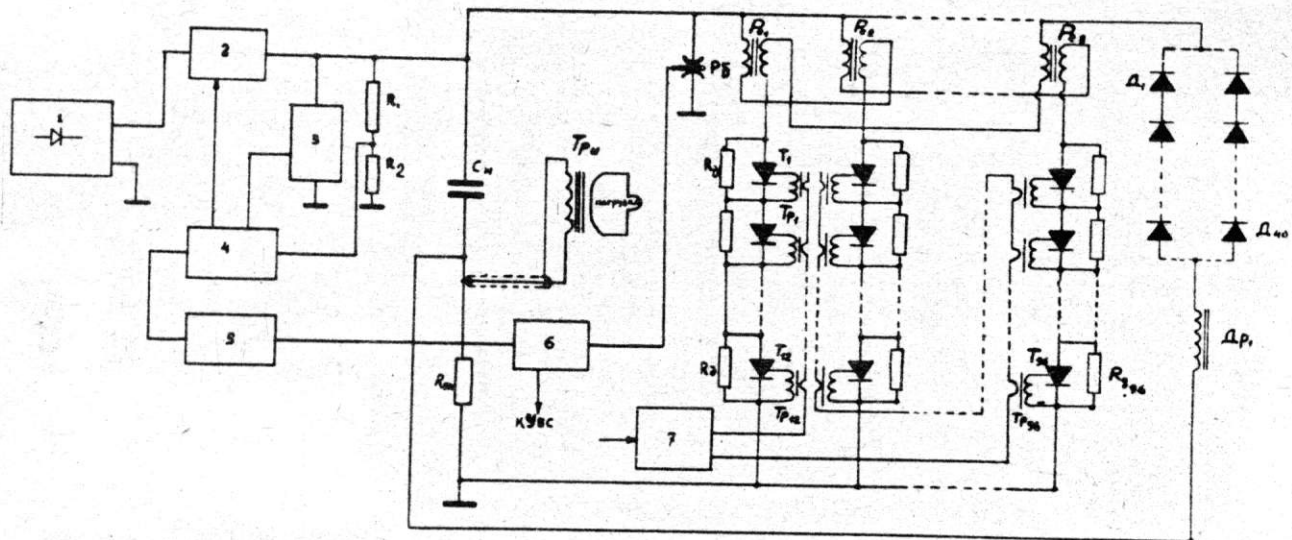


Рис. 1. Схема генератора. 1 - выпрямитель, 2 - зарядное устройство, 3 - схема сброса, 4 - схема сравнения, 5 - схема параметрической стабилизации, 6 - схема защиты тиристоров, 7 - генератор запуска, C_H - накопительная емкость, $T_{pИ}$ - согласующий импульсный трансформатор, $T_1 \div T_{96}$ - коммутирующие вентили, $R_e \div R_e$ - анодные реакторы, $D_1 \div D_{40}$ - перезарядные диоды, D_p - перезарядный дроссель, $R_{Д1} \div R_{Д96}$ - делитель

Непосредственная коммутация импульсного тока в цепи нагрузки в рассматриваемом случае неперемнима ввиду отсутствия вентиля на такие токи. В данном случае применен согласующий импульсный трансформатор в сочетании с высоковольтным коммутирующим вентилем на ток в десятки килоампер.

Генератор (схема генератора представлена на рис. 1) состоит из накопительной емкости C_H , которая заряжается через управляемый вентиль $T_1 \div T_{96}$ на первичную обмотку импульсного трансформатора ($T_{pИ}$). Для рекуперации энергии производится перезарядка емкости через специальный перезарядный дроссель (D_p) и перезарядные диоды ($D_1 - D_{40}$).

С целью кратковременной стабилизации амплитуды тока (как показывает опыт) оказывается достаточным стабилизировать напряжение на накопительной емкости. В данном случае применен способ стабилизации напряжения путем порционного сброса заряда специальной схемой сброса (3) управляемой от схемы сравнения (4) [1]. В данном генераторе из-за больших динамических и тепловых нагрузок в контуре наблюдается медленный уход его параметров во времени. Поэтому для компенсации таких уходов предусмотрена схема автоматической подстройки амплитуды тока (5) путем плавного изменения уровня стабилизируемого напряжения на емкости.

Согласующий трансформатор ($T_{\text{н}}$) выполнен по принципу "кабельного" [2]. Для уменьшения активных потерь и индуктивности рассеяния трансформатора он представляет собой объемный вторичный виток 3, в закрытые позы которого помещена первичная обмотка в виде широких плоских витков 4 (рис. 2). Такая конструкция обеспечивает полную связь потока вторичной обмотки с первичной, а потоки рассеяния отдельных первичных витков не связаны друг с другом, благодаря чему индуктивность рассеяния пропорциональна первой степени числа витков. При этом витки первичной обмотки динамически уравновешены. Они изолированы от вторичного витка эпоксидной изоляцией толщиной 4 мм на напряжение 20 кв. Коэффициент трансформации равен 40. Индуктивность рассеяния $8 \cdot 10^{-9}$ гн. Сечение магнитопровода 5×600 см², размах индукции в железе при токе 10^6 а - 15 кгаусс.

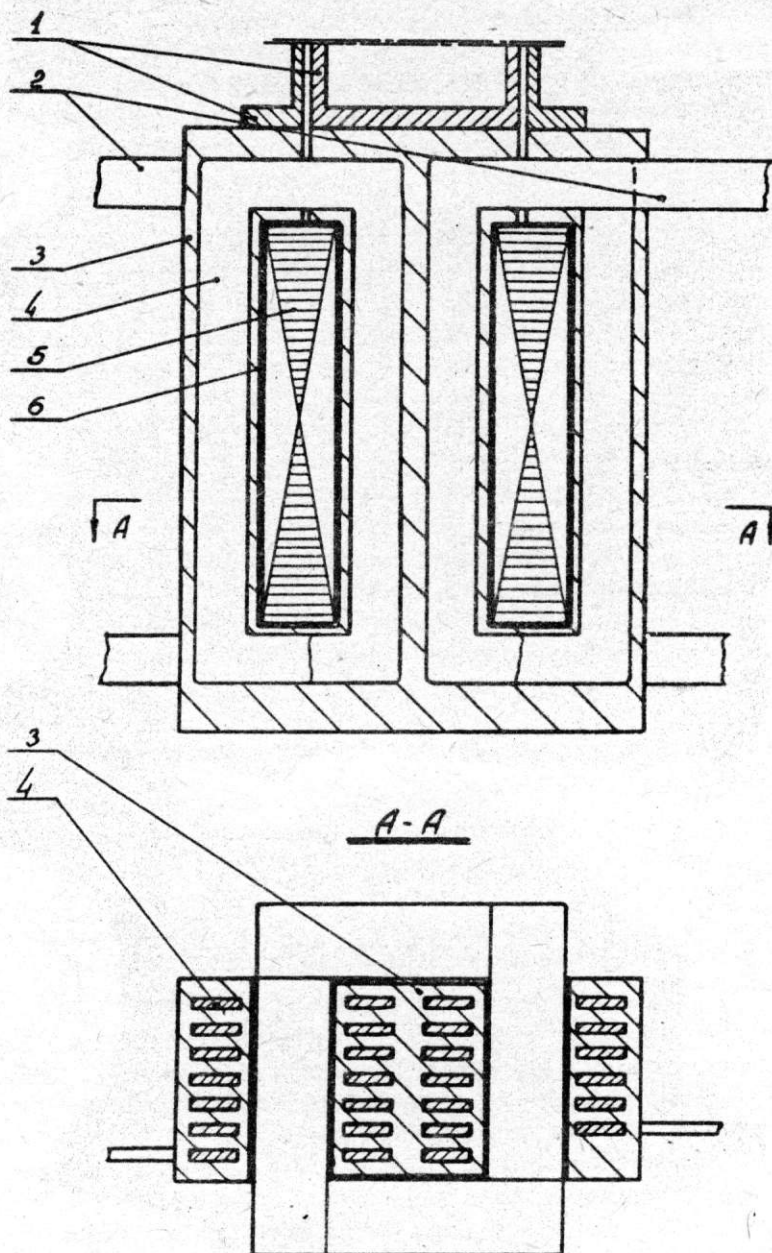


Рис. 2. Импульсный трансформатор. 1 - малоиндуктивный вывод вторичной обмотки, 2 - ввод первичной обмотки, 3 - объемный виток вторичной обмотки, 4 - виток первичной обмотки, 5 - магнитопровод, 6 - изоляция магнитопровода

Основная проблема при создании генератора состояла в разработке коммутирующего вентиля на 25 ка при напряжении 10 кв и длительности импульса порядка 1 мсек,

Мы отказались от обычно применяемых в подобных схемах ртутных вентилях из-за их громоздкости и сложности в эксплуатации.

Для данного генератора разработано два типа вентилях. В схеме на рис. 1 приведен первый вариант, выполненный на тиристорах, которые имеют малые габариты, не требуют накальных цепей, мало критичны к изменению внешней температуры и долговечны.

Были проведены исследования тиристоров в режиме коммутации коротких импульсов, которые показали, что тиристоры типа УПАКЛ-150 или ВКДУ-150 способны коммутировать токи до 5 ка при длительности синусоидального импульса порядка 1 мсек. В таком режиме тиристоры выдерживают несколько миллионов импульсов без заметного изменения параметров. В рабочей схеме генератора, для обеспечения надежности, был выбран режим порядка 3 ка через каждый тиристор.

Коммутирующий вентиль генератора состоит из 8 параллельных ветвей по 12 последовательно включенных тиристоров типа ВКДУ-150-7 в каждой ветви. Параллельно каждому тиристоры подключено сопротивление ($R_{д1} \div R_{д96}$) для выравнивания потенциалов, а каждая ветвь соединена с общей точкой цепи через связанные анодные реакторы ($R_{e1} \div R_{e8}$), которые обеспечивают деление токов по ветвям с точностью до 10%. Тиристоры управляются от одного генератора запуска (7) через импульсные трансформаторы ($Tr_1 \div Tr_6$, первичная обмотка представляет собой одиночный провод с высоковольтной изоляцией (магнето), проходящей последовательно через магнитопроводы всех трансформаторов.

Особенностью работы тиристоров является то, что одиночные перегрузки по амплитуде свыше 8 ка и скоростью нарастания тока более 20 а/мксек могут полностью вывести из строя отдельные тиристоры или целые последовательные ветви. Это требует специальной защиты тиристоров. Для этой цели разработан блокировочный разрядник (R_6) с твердым изолятором. При срабатывании электронной схемы защиты (8), реагирующей на амплитуду и производную тока, происходит взрывной пробой и разрядник через несколько мксек закорачивает весь коммутатор, спасая тем самым тиристоры от разрушения. Эта же схема через систему УБС выключает питание генератора.

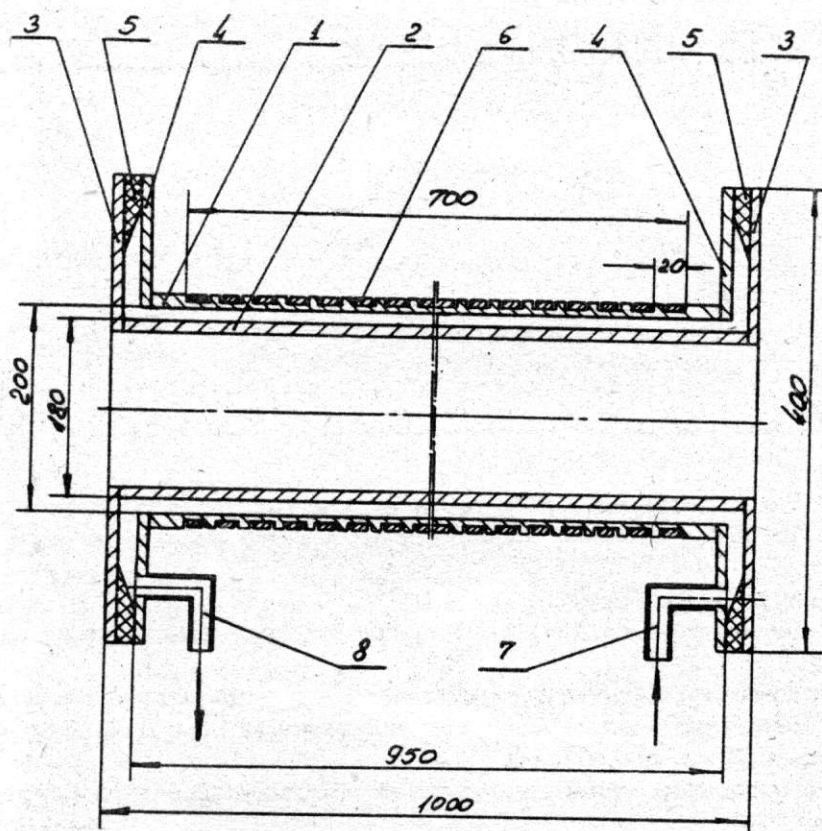


Рис. 3. Конструкция разрядника. 1 - катод, 2 - анод, 3 - торцевые диски анода, 4 - торцевые диски катода, 5 - изолятор, 6 - обмотка управления, 7 - напускной патрубок, 8 - откачной патрубок

Перезарядка накопительной емкости осуществляется через дроссель (D_1) и через четыре параллельные ветви диодов типа ВКДЛ-200-9, включенные последовательно по 10 штук ($D_1 \div D_{40}$). Длительность перезарядного импульса 10 мсек при амплитуде 2,6 ка.

В качестве второго варианта коммутатора разработан газоразрядный вентиль, управляемый с помощью импульсного магнитного поля (рис. 3).

Катод 1 и анод 2 выполнены в виде двух коаксиальных цилиндров из нержавеющей стали, переходящих на торцах в изолированные друг от друга диски 3 и 4, к которым симметрично крепятся подводящие кабели. На наружной трубе - катоде сделана винтовая канавка, в которую бифилярно уложена обмотка 6 из медной шины $2 \times 10 \text{ мм}^2$, формирующая магнитное поле в рабочем зазоре.

Поле имеет максимальную величину вблизи катода и быстро падает по направлению к аноду. В аксиальном направлении вдоль катода оно меняет как величину, так и знак с периодичностью шага обмотки.

Толщина стенки катода из нержавеющей стали составляет 1 мм, поэтому скин-эффект играет очень малую роль и импульсное поле между анодом и катодом во времени практически повторяет форму импульсного тока в обмотке управления в диапазоне 100 мксек \div 2 мсек (см. рис. 4).

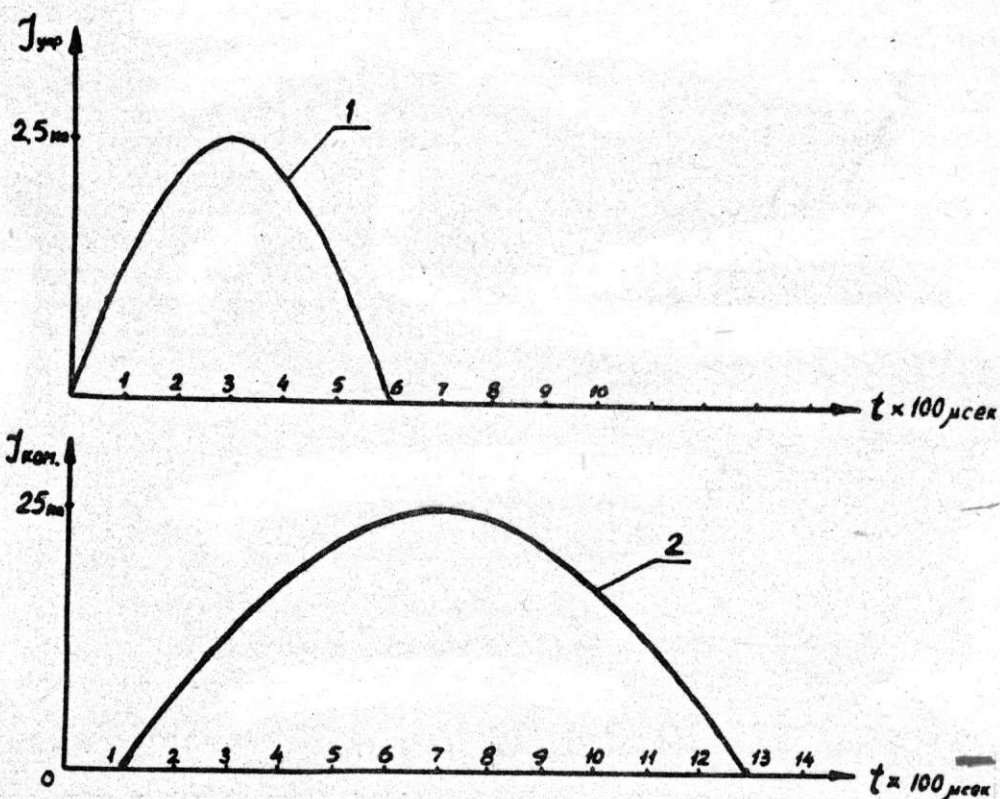


Рис. 4. Временные диаграммы. 1 - ток управления разрядника, 2 - ток, коммутируемый через разрядник

Вентиль работает в диапазоне давлений $3 \cdot 10^{-3} \div 6 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст. в случае воздуха и аргона при зазоре анод-катод 1 см и амплитуде импульсного поля на поверхности катода 500 э.

Такой способ уравнивания обеспечивает вентильность и равномерное распределение разряда по всей поверхности электродов под управляющей обмоткой. Вентиль надежно работает в режиме 25 ка при 10 кв и 1 мсек.

В таком режиме генератор успешно выдержал 10^5 импульсов и продолжает надежно работать.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б.Ф. Баянов, А.В. Ильин, В.Н. Пакин, А.П. Панов, Г.И. Сильвестров "Генератор импульсного тока" Преприят ИЯФ СО АН СССР № 85, 1966.
2. В.Р. Карасик ПТЭ, 1962, № 6, стр. 5.

43. ОДНОВИТКОВЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ С ШИХТОВАННЫМ МАГНИТОПРОВОДОМ

Данилов Л.Л., Сильвестров Г.И., Трахтенберг З.М. (Институт ядерной физики СО АН СССР)

В работе рассматриваются разработанные в ИЯФ СО АН СССР одновитковые импульсные поворотные-фокусирующие магниты и квадрупольные линзы [1,2], поле в рабочем зазоре которых формируется полосами шихтованного магнитопровода и скин-овыми поверхностями токонесущих шин. Распределение поля в апертуре таких импульсных систем задается не только конкретным профилем полосов магнитопровода, но и профилем токонесущих шин, что обеспечивает высокий коэффициент использования магнитного поля.

Такие магнитные системы по ряду параметров выгодно отличаются от аналогичных систем с постоянным полем на ту же энергию частиц: практически отсутствуют поля рассеяния, минимально сечение магнитопровода и обмоток возбуждения, выполненных в виде одиночной шины.

Минимальные габариты, вес и потребляемая мощность наряду с хорошими характеристиками магнитного поля делают предпочтительным применение импульсных магнитов и квадрупольных линз в системах впуска-выпуска частиц из ускорителей и в обычных электронно-оптических схемах для транспортировки пучков, особенно при частотах следования импульсов порядка нескольких герц, на которых работают большинство современных ускорителей на большие энергии.

Существенное внимание при разработке конструкций было уделено вопросам, связанным с прочностными свойствами системы при использовании максимально возможных полей в стали магнитопровода и вопросам формирования краевых полей.

1. Одновитковый поворотный-фокусирующий магнит

Продольное и поперечное сечение магнита представлено на рис. 1. Шихтованный магнитопровод 1 изготавливается из штампованных листов трансформаторной стали, склеенных эпоксидной смолой на специальном направляющем шаблоне и клеивается ею же в силовой кожух 2. Затем, за одну установку обрабатываются базовые поверхности под внутреннюю токонесущую шину 3, изолированную от магнитопровода, и наружную токонесущую шину 5, непосредственно без изоляции крепящуюся к силовому кожуху. Внутренняя шина жестко крепится к силовому кожуху шпильками 4, проходящими через сечение магнитопровода и изолированными от него. Крышками 9 шпильки уплотняются на вакуум.

С одного края магнита токонесущие шины электрически соединены торцевым экраном 11 с прямоугольным отверстием. С другого края токонесущая шина 3 электрически соединена с торцевым экраном 10 с прямоугольным отверстием, который переходит на наружный электрод коаксиального токопровода 12, внутренний электрод которого электрически соединен с токонесущей шиной 5. Коаксиальный токопровод вакуумно уплотнен на радиусной крышке 6.

При выполнении допусков на механическую обработку такая конструкция обеспечивает требуемую точность взаимного расположения внутренней и внешней токонесущих шин относительно друг друга и относительно конусных поверхностей магнитопровода.

Использование силового кожуха для крепления токонесущих шин и магнитопровода обеспечивает высокую механическую прочность и жесткость конструкции.

Силовой кожух совместно с радиусной 6 и торцевыми крышками 7 и 8 образуют вакуумно-плотный корпус, что позволяет отказаться от специальной вакуумной камеры.

Поскольку магнитное поле проникает в обмотку на толщину скин-слоя, то практически поля рассеяния в магните отсутствуют, что сводит к минимуму сечение магнитопровода.

Следует заметить, что в целом конструкция магнита эквивалентна коаксиалу специальной формы, заполненному шихтованным магнитопроводом, благодаря чему внешние поля таких магнитов могут быть сделаны как угодно малыми, что существенно для многих практических случаев.

Измерения полей в магнитах показали, что расчетная топография поля выполняется практически во всей апертуре. Искажения поля в апертуре обязаны только наличию изоляционных зазоров между токонесущими шинами и полюсами магнитопровода.

Особенностью краевых полей в импульсном магните является то, что поле, замкнутое в рабочем объеме скиновыми поверхностями токонесущих шин получает на краях, при вываливании в торцевые отверстия экранов, дополнительные радиальные составляющие.

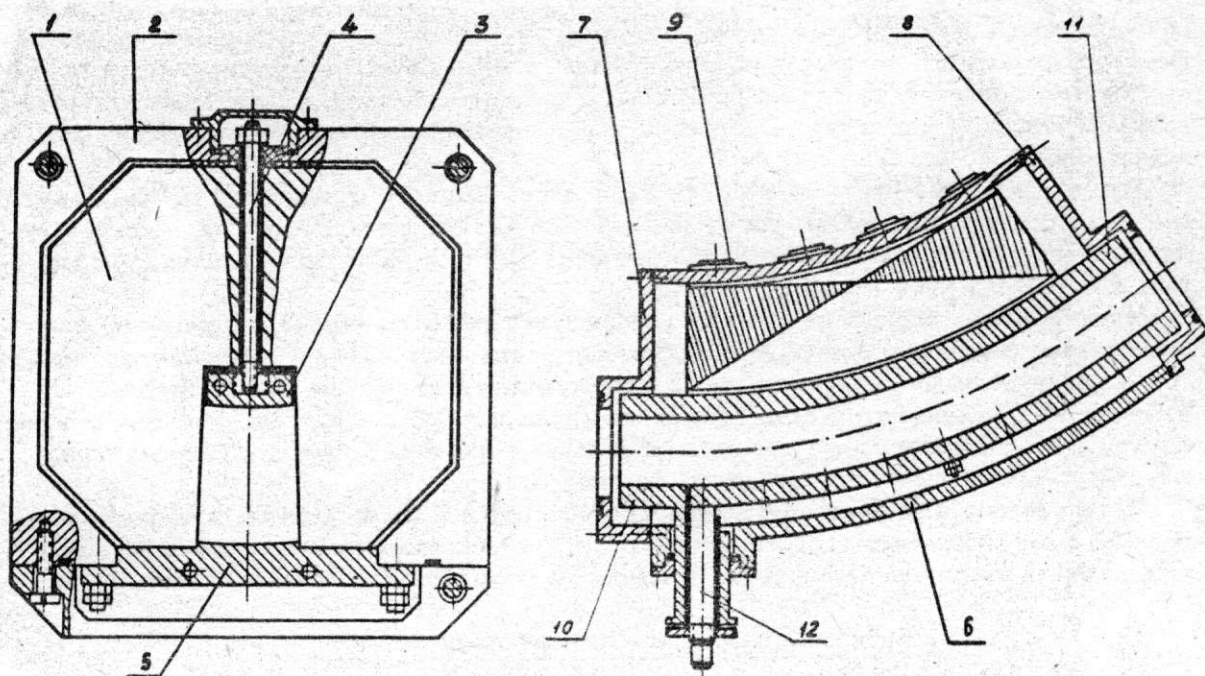


Рис. 1. Поперечный и продольный разрез магнита. 1 - магнитопровод, 2 - силовой кожух, 3 - внутренняя шина, 4 - крепежные шпильки, 5 - наружная шина, 6 - радиусная крышка, 7, 8 - торцевые крышки, 9 - крышка, 10, 11 - торцевые экраны, 12 - коаксиальный токоподвод

Для устранения радиальных составляющих краевых полей мы формируем провисающие поля скиновыми поверхностями торцевых экранов, которыми служат стенки отверстий в толстых торцевых шинах 10, 11.

Характерные параметры импульсных магнитов, применяемых в электронно-оптических системах комплекса ВЭПП- [3], при энергии электронов $E = 350$ Мэв и частоте повторения импульсов 1 герц приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры поворотно-фокусирующих магнитов

Равновесный радиус, мм	Угол поворота, град	Вертик. зазор, мм	Радиальный зазор, мм	Рабочий ток, ка	Рабочее поле, кэ	Индуктивность, мкГн	Потребляемая мощн., вт	Вес, кг
900	50	30	50	31	13	1,8	400	150
750	35	50	70	62	17,5	0,8	800	120

2. Импульсная одновитковая квадрупольная линза

На рис. 2 приведены продольное и поперечное сечение линзы. Шихтованный магнитопровод 1 с гиперболическими полюсами выполнен из штампованных листов трансфор-

маторной стали, склеенных эпоксидной смолой, и имеет плоскость разреза 9 по межполюсному зазору.

В межполюсных зазорах расположены цельнопаянные токонесущие шины 2 гиперболического профиля, изолированные от магнитопровода.

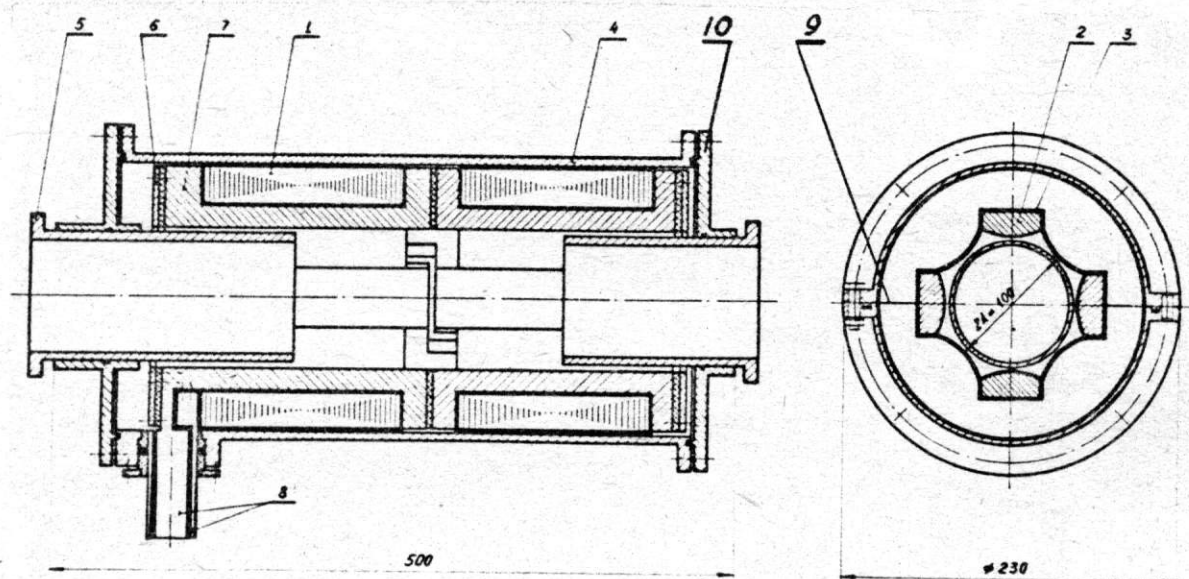


Рис. 2. Общий вид линзы. 1 - магнитопровод, 2 - токонесущая шина, 3 - изолятор, 4 - разрезная центрирующая труба, 5 - регулировочная втулка, 6 - экранирующий диск, 7 - торцевая шина, 8 - токоподвод, 9 - плоскость разреза, 10 - фланец

Коммутация шин (см. рис. 3) обеспечивает разворот каждой последующей секции относительно предыдущей на угол 90° , так что ток последовательно обходит все межполюсные зазоры двух или более секций.

Токонесущие шины и коммутация выполнены в виде цельнопаянной одиночной шины с впаянной трубкой охлаждения.

После сборки цельнопаянных токонесущих шин с разрезным магнитопроводом вся система вставляется в общую центрирующую трубу 4, имеющую также плоскость разреза, которая вместе с торцевыми фланцами 10 является вакуумным кожухом. На торцах линзы располагаются уплотненные на вакуум медные втулки 5 перемещением которых регулируется длина секций линзы. Экранирующие диски 6 уменьшают в случае отсутствия втулок влияние полей торцевой коммутации на краевые поля. Подвод тока осуществляется коаксиальным токоподводом 8, через который выведен подвод охлаждающей воды.

Конструкция линзы из-за практически полного отсутствия полей рассеяния позволяет получать максимальные градиенты, поскольку поле на краю рабочей области апертуры равно индукции в стали магнитопровода. При этом линейный рост поля с расстоянием от оси выполняется с точностью лучше 1% во всей апертуре вплоть до индукции в стали магнитопровода $B = 2 \cdot 10^4$ гаусс.

Наличие экранирующих втулок и дисков обеспечивает достаточно хорошую линейность краевых полей на входе и выходе линзы. В пространстве же между секциями, благодаря малому расстоянию между ними, краевые эффекты вообще отсутствуют и поля линейны с той же точностью, что и внутри секций линзы. В результате этого линейный рост с расстоянием от оси интеграла поля по длине линзы выполняется с точностью 1% при отношении длины секции к апертуре вплоть до 0,6. Следствием описанного свойства являются, во-первых, минимальные aberrации за счет нелинейностей полей и, во-вторых, возможность уменьшения длин секций при заданной апертуре и достаточно больших градиентах, что приводит к уменьшению астigmatизма пары квадруполов.

Следующей особенностью импульсной линзы является возможность изменения параметров секций, необходимого при настройке, путем изменения эффективной длины пе-

ремещением втулок при постоянном градиенте. Одновременно это позволяет питать секции последовательно, что не только уменьшает число стабилизированных источников питания, но и ослабляет требования к точности стабилизации.

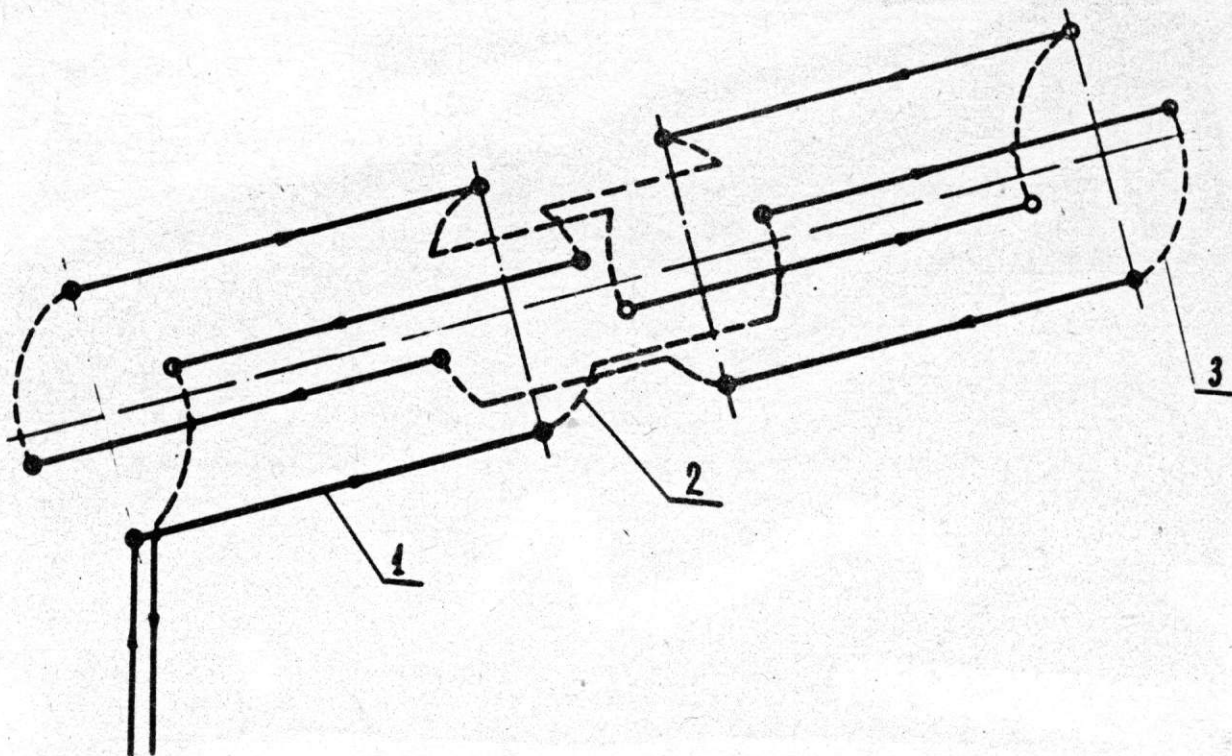


Рис. 3.- Коммутация токонесущих шин. 1 - формирующие шины, 2 - коммутационные шины, 3 - торцевые коммутационные шины

Параметры линз применяемых на комплексах со встречными пучками ИЯФ СО АН СССР приведены табл. 2.

Таблица 2

Параметры одновитковых квадрупольных линз

Апертура, мм	Длина секции, мм	Индуктивность, мкГн	Рабочий ток, ка	Максимальный градиент, кэ/см	Вес, кг
100	200	1,5	55	3,5	80
70			40	5,0	65

В заключение заметим, что для упрощения задачи коммутации токов в десятки килоампер, потребляемых одновитковыми импульсными элементами, наиболее рационально питать их через токовый согласующий трансформатор с малой индуктивностью рассеяния, первичная обмотка которого включена в разрядный контур импульсного генератора тока [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилов Л.Л. и др., Электромагнит синхротрона, Авторское свидетельство № 212394, 1968 г., Бюллетень № 9.
2. Сильвестров Г.И. и др., Квадрупольная магнитная линза, Авторское свидетельство № 212398, 1968 г., Бюллетень № 9.
3. Международная конференция по ускорителям, Дубна, 1963 г. стр. 274.
4. Баянов Б.Ф. и др., "Генератор импульсов тока с амплитудой 10^6 ампер", настоящий сборник, стр. 283.

44. ФОРМИРОВАНИЕ ПОСТОЯННОГО И ИМПУЛЬСНОГО ПОЛЕЙ ОБЩИМИ ЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ ЖЕЛЕЗА В СИСТЕМАХ ДЛЯ ПРОВОДКИ ПУЧКОВ ЧЕРЕЗ ОБЛАСТЬ ПОСТОЯННОГО ПОЛЯ

В.Н. Пакин, Г.И. Сильвестров (Институт ядерной физики СО АН СССР)

При создании ускорителей и накопителей одной из сложных задач является выпуск и впуск частиц, а также проводка их через область сильно неоднородных полей рассеяния вне рабочей апертуры. При этом в случае аксиально-симметричного поля применяют железные экраны с компенсацией искажений магнитного поля специальными обмотками с постоянным током [1], а в случае ускорителя с линейными промежутками — сильные импульсные магниты [2], позволяющие вывести пучки за пределы магнитной системы на длине линейного промежутка.

Нами уже описывалась ранее [3] система для проводки частиц через область полей рассеяния путем компенсации их встречным импульсным полем безжелезного коаксиала со специальными профилем токовых шин. Однако в таких системах из-за больших переменных градиентов поля рассеяния трудно сформировать импульсное поле в значительной области вокруг оси пучка и обеспечить хорошую компенсацию.

В настоящем докладе рассматривается система [4], в которой сняты эти трудности: как постоянное, так и импульсное компенсирующее поле формируются общими эквипотенциальными поверхностями железа. Импульсное поле формируется дополнительно скиновыми поверхностями профилированных токонесущих шин, что обеспечивает при соответствующей амплитуде импульсного тока автоматическую компенсацию полей во всей апертуре впускной системы.

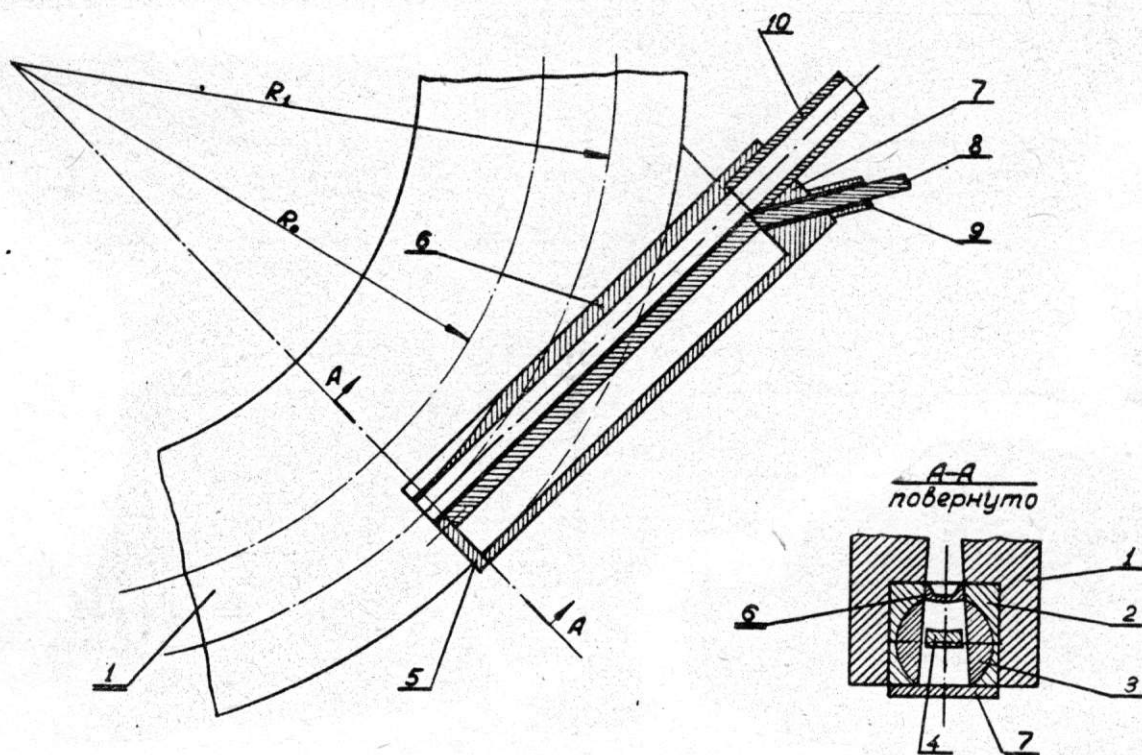


Рис. 1. Компенсирующая система для впуска в постоянное поле: 1 — полюса постоянного магнита; 2 — магнитные накладки; 3 — шихтованные вкладыши; 4 — внутренняя шина; 5 — торцевая шина с отверстием для выхода пучка; 6 — 7 — наружные шины; 8 — 9 — коаксиальный токоподвод; 10 — экранирующая стальная труба

На рис. 1 приведен чертеж впускной системы. В полюсах постоянного магнита 1 делаются выборки, в которых закрепляются специальные магнитные накладки 2 так, что профиль полюсов сохраняет прежнюю форму. Между накладками впаяна медная шина 6, переходящая на конце в тонкую стенку ("септум"), которая вместе с на-

ружной 7 и внутренней 4 шинами образует замкнутую на торпе систему. Часть накладок над внутренней шиной 3 делается шихтованной и через нее замыкается импульсный магнитный поток, создающий встречное компенсирующее поле по траектории впуска. Величина шихтованной области выбирается такой, чтобы в том сечении, где поля складываются, пропустить импульсный поток без насыщения железа. Токоведущие шины 4 и 6 профилированы в области впуска по силовым линиям постоянного магнитного поля.

Система питается однополярным импульсом тока, представляющим собой полупериод синусоиды с длительностью по основанию в несколько сотен микросекунд от специального токового трансформатора. Инжекция частиц производится на максимуме синусоиды. Магнитные измерения показали, что при равенстве интегралов постоянного и импульсного полей по оси впуска точность компенсации составляет $\pm 0,5\%$ в области с диаметром, равным зазору между шинами. Измерения производились при длительности импульса тока 460 мксек, амплитуде тока 24 ка и величине компенсируемого поля 6 кэ.

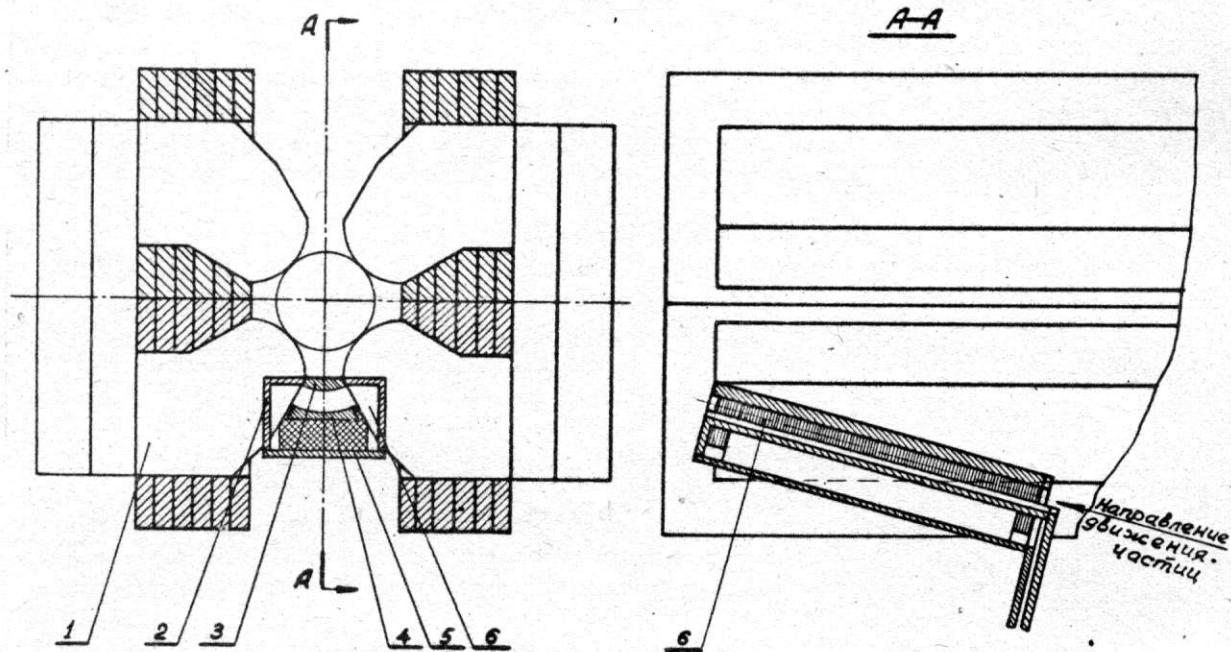


Рис. 2. Компенсирующая система для проводки пучка через зазор линзы: 1 - полюса линзы; 2 - стальной короб; 3 - 4 - 5 - токоведущие шины; 6 - шихтованные вкладыши

Внешние поля такой системы имеют величину $\sim 2\%$ от поля в апертуре при длительности импульса 460 мксек и уменьшаются пропорционально длительности импульса до 0,5% при длительности 110 мксек, что хорошо согласуется с расчетом [2].

Аналогичная система применяется нами для проводки частиц через постоянное поле в зазоре квадрупольной линзы при инжекции электронного пучка в накопитель ВЭПП- III [5] (рис. 2). В полюсах 1 линзы сделаны пазы, в которых крепятся стальной короб 2 с вклеенными шихтованными вкладышами 6 и токоведущие шины 3, 4, 5, профилированные по силовым линиям постоянного поля. Средняя величина компенсируемого поля 300. Работа этой системы полностью подобна вышеописанной.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.А. Арзуманов и др. Атомная энергия, 10, 461, 1961.
2. Т.А. Всеволожская и др. Атомная энергия, 22, 210, 1966.
3. Г.И. Будкер и др. Международная конференция по ускорителям. Дубна, 1963, М., Атомиздат, 1964, стр. 274.
4. Л.Л. Данилов и др. Решение о выдаче авторского свидетельства № 1020764/26-25 от 30/VI-66 г.
5. Т.А. Всеволожская и др. "Электронно-оптический канал накопителя ВЭПП- III. Настоящий сборник, стр. 495.

ДИСКУССИЯ

Дзержач А.И. Какова толщина листов шихтованного железа?

Пакин В.Н. От 0,1 до 0,35 мм.

Лазарев Н.В. Как взаимодействовали системы питания?

Пакин В.Н. Взаимодействия нет, т.к. импульсный поток экранируется скиновыми поверхностями.

59. ИМПУЛЬСНЫЕ ИСТОЧНИКИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ВОДОРОДА ДЛЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЕЙ

Г.И. Димов, И.Я. Тимошин, О.Я. Савченко, Ю.Г. Кононенко, В.Г. Шамовский
(Институт ядерной физики СО АН СССР)

В Институте ядерной физики СО АН СССР сконструировано несколько импульсных источников отрицательных ионов водорода для установки в высоковольтных электродах электростатических ускорителей, предназначенных в качестве перезарядных инжекторов. Их конструированию предшествовали эксперименты на стендах [1-3], в которых были получены пучки ионов H^- с токами до 8 ма диссоциативным методом и до 15 ма перезарядным методом, а также опыт эксплуатации изготовленного ранее источника с импульсным током ионов H^- до 1,5 ма [4].

В двух нижеописанных плазменных источниках ионы H^- образуются в газовом разряде в результате диссоциации молекул водорода. Основным конкурирующим процессом является их разрушение электронным ударом. С поверхности плазмы экстрагируется ток ионов H^- с плотностью

$$J_{-} \sim \frac{e \langle v_{-1} \rangle < \sigma_{-1} V_e \rangle}{\sigma d \lambda < \sigma_e V_e \rangle},$$

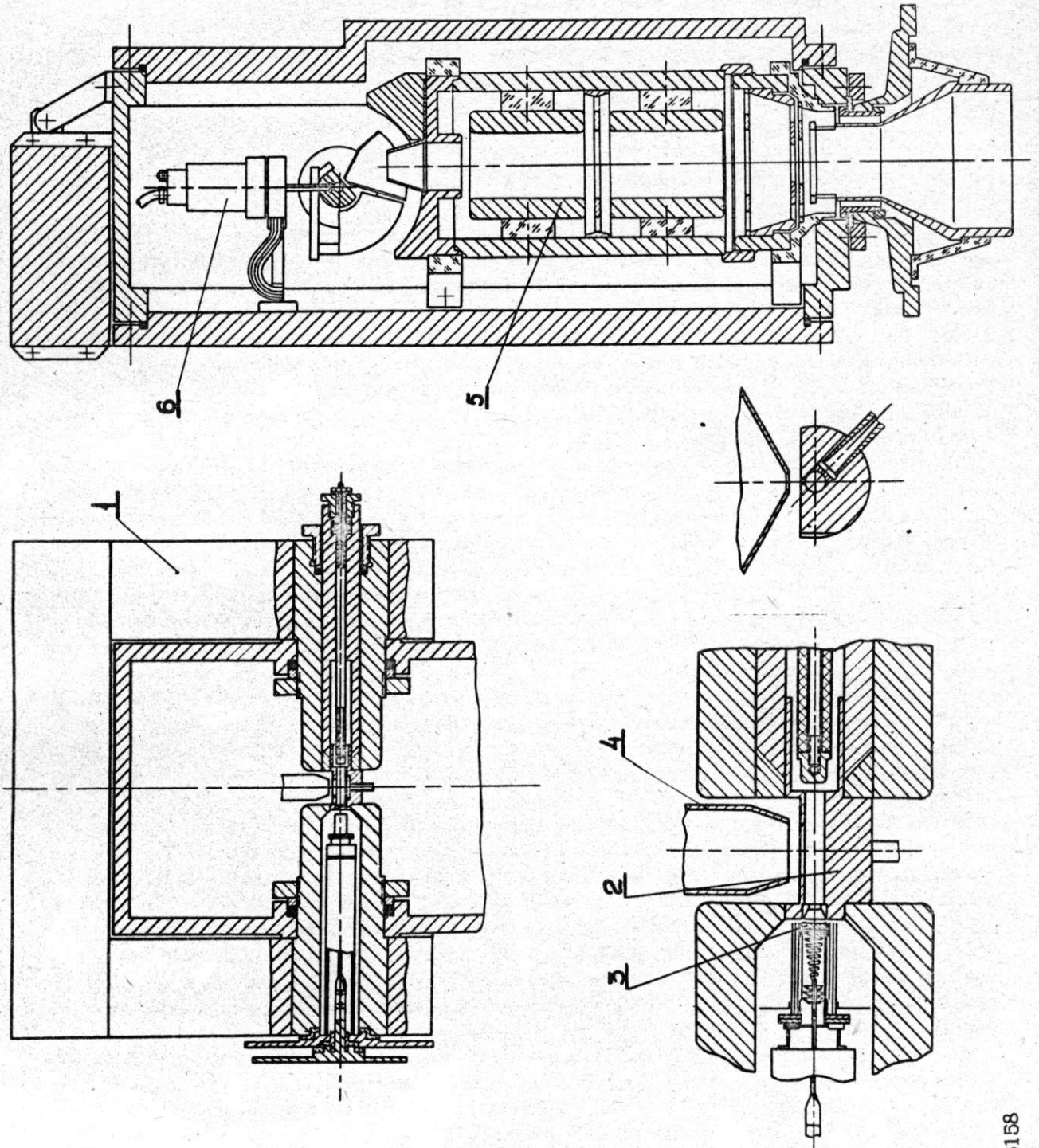
где V_{-1}, V_e - скорости отрицательных ионов и электронов в плазме, λ - эффективная толщина слоя водорода в вытягивающем промежутке, σ_{-1} - сечение образования ионов H^- , $\sigma_e, \sigma d$ - сечения разрушения H^- электронным ударом и при столкновениях с молекулами. Оптимальная плотность водорода в разрядном канале $n_0 \sim (\sigma d \lambda)^{-1}$. Выход H^- , рассчитанный по приведенной формуле на основе зондовых измерений параметров плазмы, оказался несколько ниже экспериментально наблюдаемого. При этом было принято максвелловское распределение электронов по скоростям. При усреднении по скоростям отрицательных ионов учитывались энергия H^- при рождении и ход потенциала в плазме.

На рис. 1 схематически представлена конструкция источника H^- с током до 5 ма в импульсе длительностью 1 мсек для вертикального ускорителя ЭГ-1,5. Через центральные отверстия в полюсах постоянного магнита с зазором 26 мм и напряженностью магнитного поля 2350 э с одной стороны вставляется катод, с другой - трубчатый анод с антикатодом. Катод представляет собой борид - лантановый диск диаметром 5 мм и толщиной 2 мм, нагреваемый излучением вольфрамовой спирали. Боковые танталовые экраны уменьшают тепловые потери и препятствуют отравлению катода парами вольфрама. Потребляемая катодом мощность 60 вт. Анодный канал диаметром 5 мм на прикатодном конце имеет сужение диаметром 3 мм, которое определяет диаметр разрядного столба. Благодаря расхождению магнитных силовых линий внутри каналов в полюсах магнита рабочая поверхность катода оказывается больше сечения разрядного столба. Антикотод находится под плавающим потенциалом. Длина разрядного канала 25 мм. Напуск водорода в разрядный канал импульсный, производится через ряд продольных щелей в стенке анода. Расход водорода $\sim 6 \cdot 10^{-3}$ см³ за импульс. К катоду подключена формирующая линия, которая обеспечивает импульсный разрядный ток до 25а при напряжении на разрядном промежутке 50в. Ионы H^- вытягиваются из разрядного столба напряжением 8 кв через продольную щель в аноде с размерами 12 × 1,5 мм. После поворота в магнитном поле ионный пучок фокусируется с помощью пары квадрупольных линз и дополнительно ускоряется для электронно-оптического согласования с ускорительной трубкой. Пластина, собирающая дрейфующие из щели источника электроны, имеет потенциал 2,5 кв, расположена перпендикулярно магнитному полю между полюсами магнита и смещена в сторону одного из них.

Источник прошел стендовые испытания на номинальном токе и установлен на ускоритель ЭГ-1,5. Примененный в этом источнике катод показал высокую надежность, его срок службы превышает 500 час. Частота срабатываний источника лимитируется скоростью откачки водорода через ускорительную трубку и не превышает 1 имп/сек.

На рис. 2 показан плазменный источник отрицательных ионов водорода для горизонтального электростатического ускорителя типа GEVW -0,4/2000 производства

Рис. 1. Источник Н-
для вертикального ЭСУ:
1 - магнит; 2 - анод;
3 - катод; 4 - вытя-
гивающий электрод;
5 - квадрупольная лин-
за; 6 - электромаг-
нитный клапан



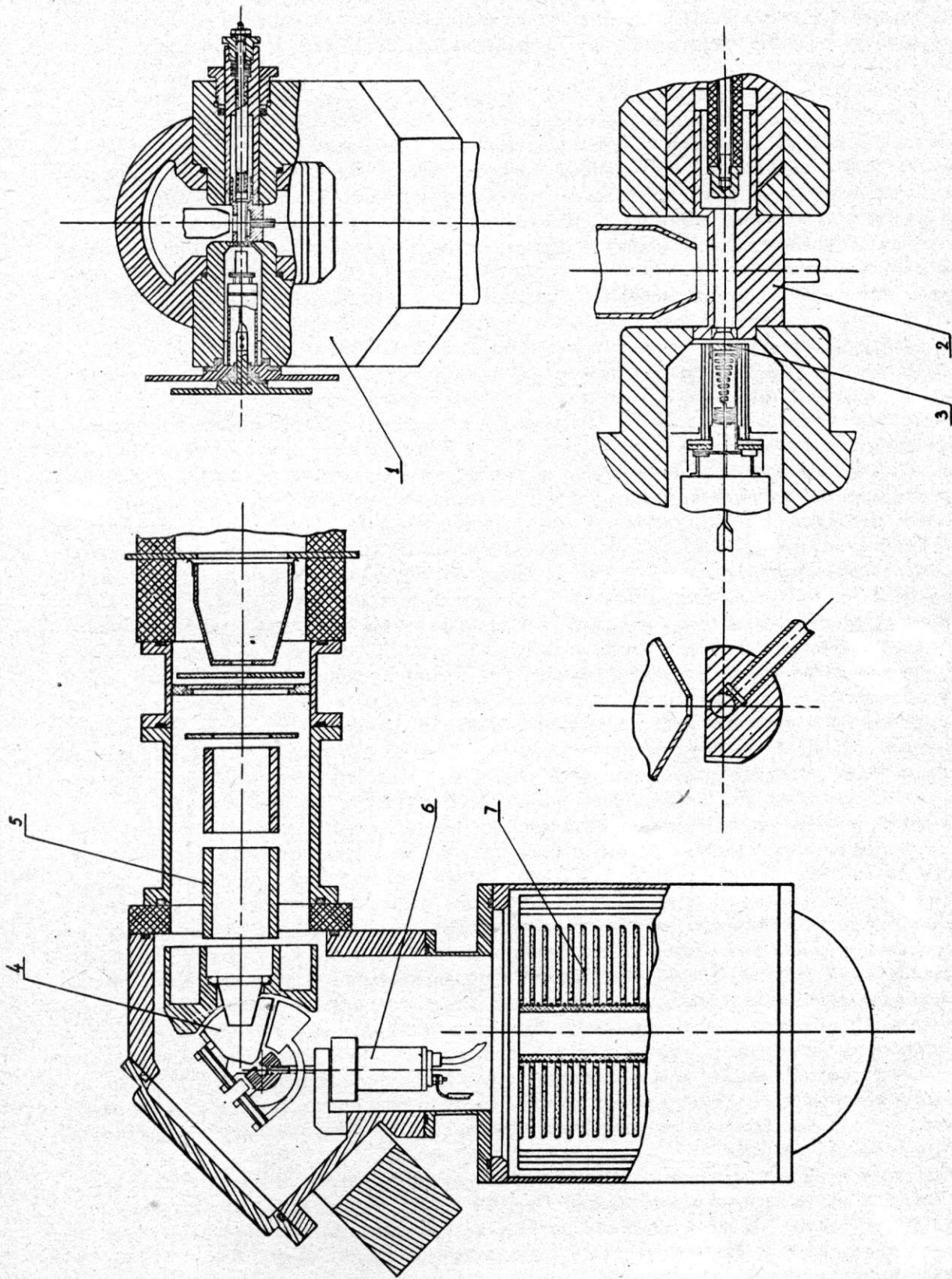


Рис. 2. Источник Н⁻ для горизонтального ЭСУ: 1 - магнит; 2 - анод; 3 - катод; 4 - вытягивающий электрод; 5 - квадрупольная линза; 6 - электромагнитный клапан; 7 - сорбционный насос

ГДР. Источник отличается от вышеописанного наличием сорбционного титанового насоса, позволяющего, несмотря на незначительную скорость откачки газа через трубку ускорителя, работать с частотой 10 гц при длительности импульсов 200 мксек, а также меньшими размерами и весом. Геометрия газоразрядной камеры и отсасывающего промежутка не изменены. Расход газа на импульс $\sim 1,5 \cdot 10^{-3}$ см³. Титановый сорбционный насос содержит 1 кг порошкообразного титана. Практически полное обезгаживание титана происходит при нагревании его до 700°C и откачке до 10^{-4} - 10^{-3} тор.

Как показал опыт, наибольшая скорость поглощения водорода при давлениях 10^{-4} - $5 \cdot 10^{-4}$ тор достигается при температуре титана 240 - 250°C. На рис. 3 приведена зависимость скорости откачки от давления и количества поглощенного водорода для 400 г титана. Из этих данных следует, что в течение нескольких дней непрерывной работы давление водорода в источнике не будет превышать $5 \cdot 10^{-4}$ тор. Это давление допустимо для нормальной работы источника. Для газовой развязки источника от ускорительной трубки в фокусе пучка установлена диафрагма диаметром 6 мм. Обезгаженный титан способен поглощать, кроме водорода, также другие газы и пары, что ведет к его отравлению. Так, при натекании воздуха 0,15 л.мк/сек в течение 3 суток скорость откачки водорода титаном уменьшилась в 2 раза. Это диктует необходимость сводить до минимума атмосферное натекание в источник.

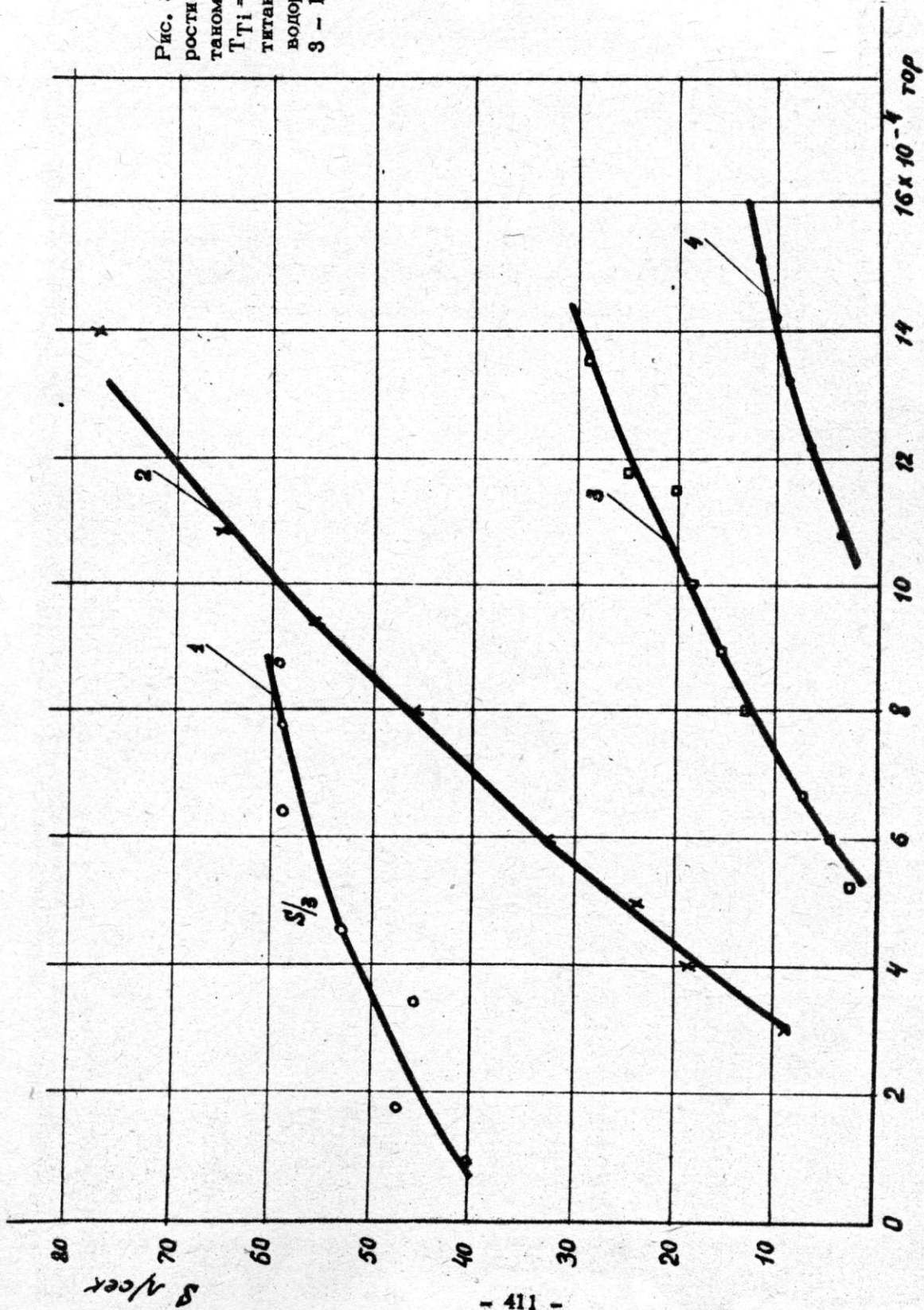
В настоящее время заканчиваются стендовые испытания источника перед установкой в ускоритель; при токе 3,8 ма пучок фокусируется в пятно размером $\sim 6 \times 6$ мм. В настоящее время подготовлен к стендовым испытаниям перезарядный источник отрицательных ионов водорода с током до 15 ма в импульсе длительностью 200 мксек (рис. 4). Геометрия и режимы работы источника вначале были детально отработаны на стационарном экспериментальном стенде. Основным узлом его является дуговой источник протонов [1]. Дуговая камера в прикатодной части на 15 мм диафрагмирована алюминиевыми шайбами. Катод полый, длиной 20 мм. Анод конический, удален от диафрагмированной части на 4 мм. Диаметр дугового канала 5 мм. Промежуток катод-анод подключен непосредственно к питающей формирующей линии. С тыльной стороны полость катода соединяется отверстием диаметром 1 мм с искровой поджигающей камерой, изготовленной из кварцевой трубки. Напуск водорода импульсный, производится через искровую камеру. Геометрия дуговой камеры и схема поджига обеспечивают высокую стабильность дугового разряда без заметного начального возмущения с температурой электронов ~ 8 эв. Из центрального отверстия в аноде диаметром 3 мм выбрасывается плазменная струя со скоростью до $1,5 \cdot 10^6$ см/сек. Струя доходит до никелевой проволочной сетки, находящейся под плавающим потенциалом и служащей для стабилизации плазменной границы. На расстоянии 3,5 мм от этой сетки установлен вытягивающий электрод, выполненный в виде прозрачной решетки из никелевых полосок. За вытягивающей решеткой установлена перезарядная трубка диаметром 25 мм и длиной 200 мм, которая заполняется водородом, выходящим из дуговой камеры. В результате ионизации водорода в трубке происходит компенсация пространственного заряда протонов непосредственно за решеткой до их перезарядки в атомы. Выходящий из перезарядной трубки пучок Н⁻ сепарируется электростатическим конденсатором, фокусируется и направляется в ускорительную трубку.

Исследование неустойчивости интенсивных компенсированных ионных пучков показало наличие механизма усиления неустойчивости газоразрядной плазмы источника в выходящем из него пучке, что должно приводить к раскачке колебаний во вторичной ионно-электронной плазме в перезарядной трубке. Благодаря высокой стабильности дугового разряда и соответствующей стабильности пучка протонов облако компенсирующих электронов оказалось достаточно устойчивым, а нейтрализация заряда протонов - практически полной.

При токе дуги 400 а в перезарядную трубку входит протонный пучок с током 800 ма. При вытягивающем напряжении 13 - 14 кв из перезарядной трубки выходит пучок Н⁻ с током 15 ма и угловым раствором 0,05 рад. Дальнейшее повышение тока дуги приводит к уменьшению выхода отрицательных ионов из-за дефокусировки протонов в вытягивающем промежутке.

В заключение авторы выражают благодарность академику Г.И. Будкеру за постоянный интерес к работе.

Рис. 3. Зависимость скорости откачки водорода титаном от давления при $T_{Ti} = 240^{\circ}C$, количество титана 400 гр. Поглощено водорода: 1 - 0; 2 - 5 л.атм.; 3 - 13 л.атм.; 4 - 64 л.атм.



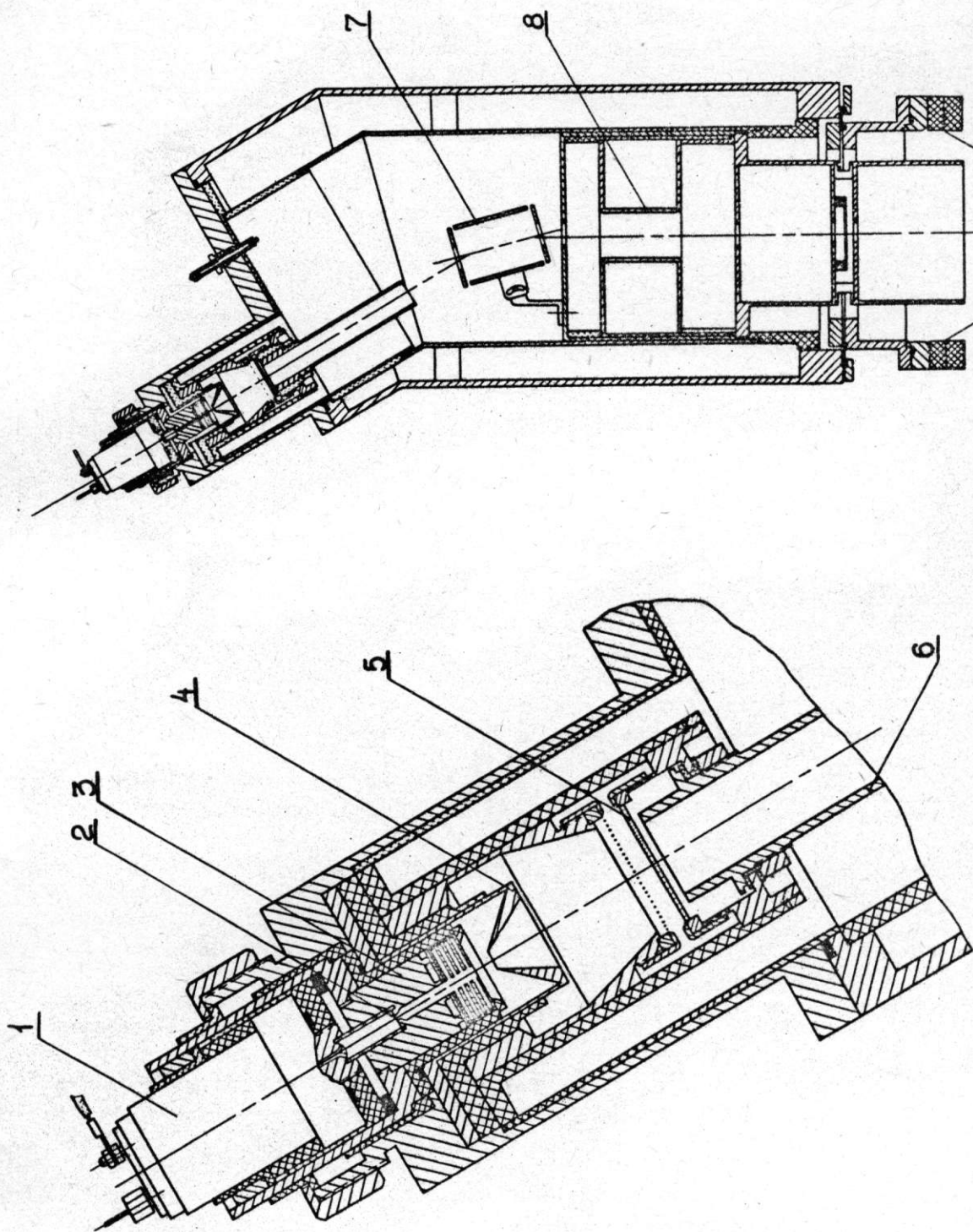


Рис. 4. Источник H⁻ перезарядного типа: 1 - электромагнитный клапан; 2 - поджигающая камера; 3 - катод; 4 - анод; 5 - вытягивающий электрод; 6 - перезарядная трубка; 7 - separating tube; 8 - одиночная линза

ЛИТЕРАТУРА

1. Димов Г.И., Кононенко Ю.Г., Савченко О.Я., Шамовский В.Г. ЖТФ, 38, 6, 997 (1968).
2. Димов Г.И., Савченко О.Я. ЖТФ, 39, 5, 1003 (1968).
3. Тимошин И.Я. Диссертация, ИЯФ СО АН СССР, 1967.
4. Димов Г.И., Тимошин И.Я., Демидов В.В., Дудников В.Г. ПТЭ, 4, 30 (1967).

Е.А. Абрамян, В.В. Вечеславов (Институт ядерной физики Сибирского отделения АН СССР)

Для ускорения протонов до энергии несколько Мэв перспективным является использование ускорителей прямого действия на основе трансформатора [1]. При таком способе ускорения практически отсутствуют ограничения на величины импульсного и среднего тока ускоряемых частиц, и они почти всецело определяются фокусирующими качествами и электрической прочностью ускорительной трубки.

Принцип и особенности работы трансформаторных ускорителей электронов подробно изложены в работе [2] и в одном из докладов настоящего совещания [3]. Ниже рассмотрены особенности получения интенсивных протонных пучков и результаты экспериментов на опытной установке ПрТ.

Для токов в десятки и сотни миллиампер обычная аксиально-симметричная оптика оказывается недостаточной и необходимо применять жесткую фокусировку [4].

В работе [5] показано, что при изучении интенсивного протонного пучка, необходимо, помимо кулоновского расталкивания, учитывать также конечную величину поперечного фазового объема V_{Π} . Максимальный пропускаемый трубкой ток I_{\max} зависит от величины V_{Π} [5,6]:

$$I_{\max} = I_{\text{пред}} [1 - (V_{\Pi} / V_0)^2], \quad (1)$$

где V_0 и $I_{\text{пред}}$ равны соответственно наибольшему фазовому объему и наибольшему току пучка, пропускаемым ускорительным каналом с заданной апертурой. Построение характеристики (1) проводится в общем случае при помощи численного решения системы соответствующих уравнений движения с использованием методов многопараметрической оптимизации [6]. При этом для каждой пары значений тока I_{\max} и фазового объема V_{Π} , связанных соотношением (1), определяются необходимые для реализации оптимального режима ускорения значения огibaющих и углов наклона пучка на входе в трубку: любое отклонение от них связано с увеличением размеров пучка внутри канала свыше допустимых.

Для обеспечения согласованных условий входа пучка в ускорительный канал приходится либо размещать после инжектора протонов специальную систему согласования [5], либо подбирать несколько первых линз самого канала таким образом, чтобы оптимизировать прохождение пучка через трубку.

В обоих случаях приходится варьировать величины градиентов линз, длины всех или части линз и свободных промежутков и т.д. Определение оптимального состояния удобно проводить методом поиска, осуществляемого на ЭВМ. В работе [7] показано, что для ионно-оптического согласования интенсивных пучков частиц весьма перспективным является применение метода случайного поиска, одним из основных преимуществ которого по сравнению с детерминированными методами градиента, скорейшего спуска и т.д. является способность проходить локальные минимумы поверхности цели, не "застревая" в них.

Электрическая прочность ускорительной трубки, по которой проходит протонный пучок, должна обеспечиваться специальными мерами. Необходимо, в частности, чтобы фокусирующая система не только транспортировала частицы основного пучка, но и эффективно удаляла из области ускорения вторичные частицы, возникающие внутри трубки. Между уменьшением длины пробега вторичных частиц и повышением электрической прочности трубки (подавление "эффекта полного напряжения") существует прямая связь, как это установлено в работах Ван-де-Граафа и его сотрудников [8].

Анализ расчетных траекторий случайных частиц, проведенный в работе [9], показал, что различные системы фокусировки, эквивалентные в отношении частиц основного пучка, имеют резко различные вторичноэлектронные характеристики и наименьшие длины пробегов обеспечиваются применением магнитных квадрупольных линз.

Для экспериментальной проверки приведенных выше соображений и сопоставления данных расчета и опыта был построен ускоритель протонов ПрТ (протонный трансформатор), общий вид которого показан на рис. 1.

В качестве источника высокого напряжения использован трансформатор ускорителя электронов для промышленных целей ЭЛТ-1,5 [2].

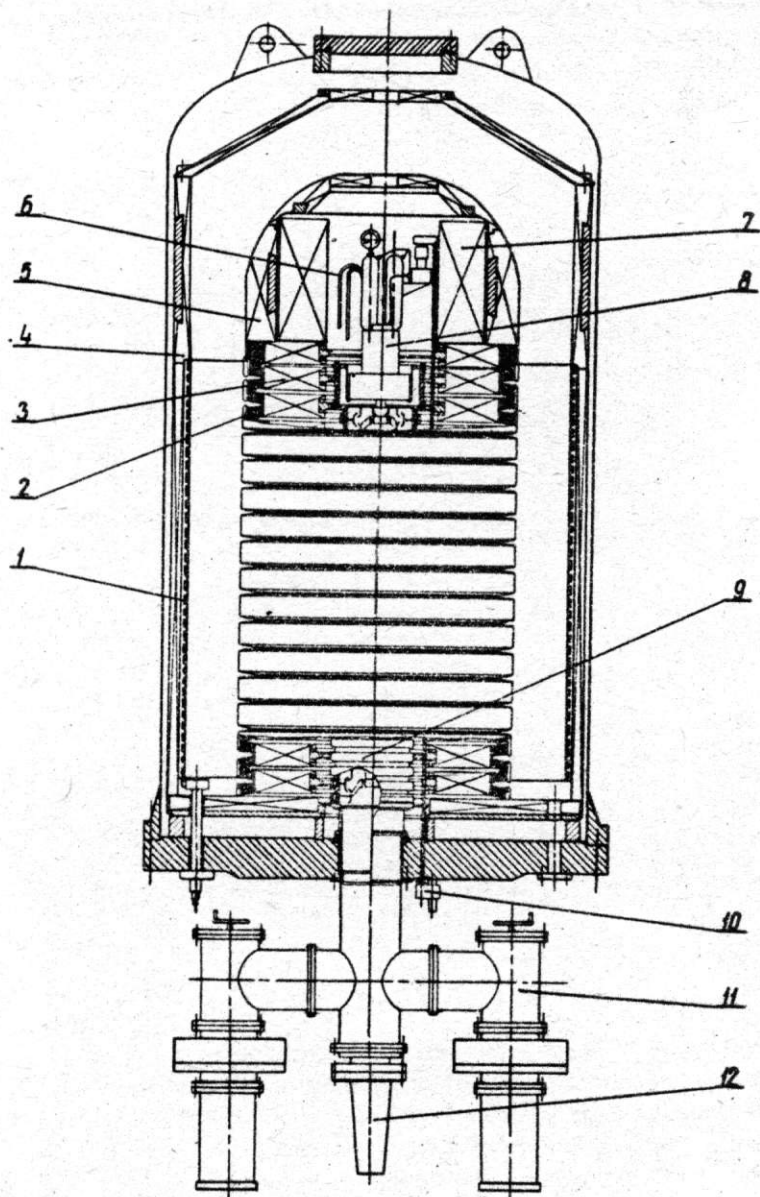


Рис. 1. Общий вид опытно-го ускорителя протонов ПрТ: 1 - первичная обмотка; 2 - катушка вторичной обмотки; 3 - диск магнитопровода; 4 - наружный магнитопровод; 5 - высоковольтный электрод; 6 - маслопровод охлаждения ионного источника; 7 - системы управления и питания ионного источника; 8 - ионный источник; 9 - ускорительная трубка с электростатическими квадрупольными линзами; 10 - шток управления натекателем водорода; 11 - высоковакуумные паромасляные насосы; 12 - токоприемный цилиндр

Эмиттером протонов является ионный источник с магнитноэлектрической осцилляцией электронов, работающий на водороде. При амплитуде ускоряющего напряжения 1,2 Мв напряжение экстракции ионов около 80 кв, ток ионов до 80 ма (импульсы 1-8 мсек, 50 гц) при содержании протонов свыше 50% и фазовой плотности пучка около 300 ма/см.мрад. При неизменном напряжении экстракции величина ионного тока может регулироваться путем изменения потенциала специального управляющего электрода, расположенного в дуговой камере источника, с крутизной управления около 2 ма/в.

Сформированный оптикой Пирса ионный пучок поступает в жесткофокусирующий электростатический канал ускорительной трубки. Применение электростатических квадруполь обусловлено тем, что они "не различают" частицы по массам при равной энергии инжекции и позволяют успешно транспортировать весь содержащийся в пучке набор ионов.

Ускорительный канал состоит из 14 линз со структурой ФОДО и периодом расстановки 15,4 см; оболочка трубки выполнена из сплошных керамических труб с секционированием изолятора металлическими кольцами [2]. Конструкция трубки приведена на рис. 2.

Первые пять линз канала найдены методом поиска, целью которого являлась оптимизация прохождения пучка через трубку и получение на выходе сечения пучка, близкого к круглому. На рис. 3 приведена схема ускорительного канала и расчетные отгибающие пучка для тока протонов 65 ма и энергии 1,2 Мэв.

Квадрупольное поле эффективно удаляет из области ускорения медленные вторичные частицы, возникающие вне оси канала внутри трубки [9]. Для удаления из канала присевших частиц в него введено знакопеременное магнитное поле с амплитудой около 20 гс, практически не влияющее на движение частиц основного пучка [10]. Это поле образуется намагниченными экранами канала (поз. 5, рис. 2), изготовленными из углеродистой стали и закаленными на мартенсит.

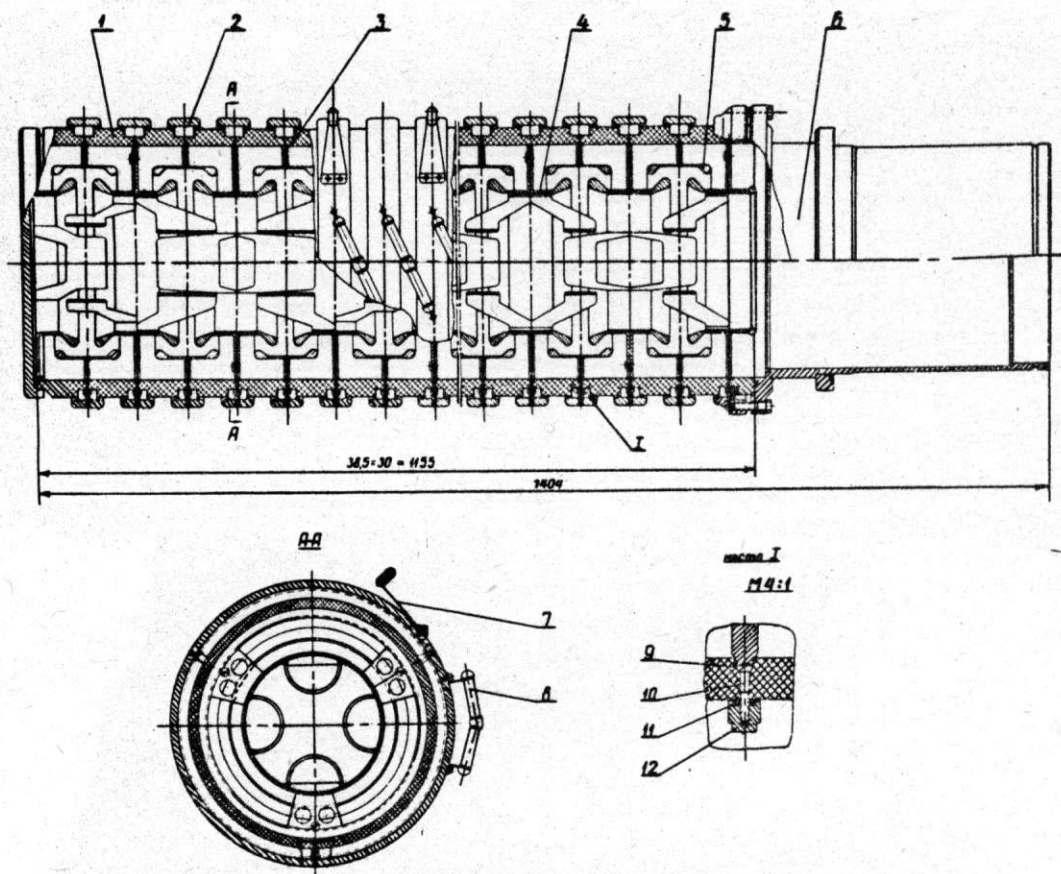


Рис. 2. Ускорительная трубка: 1 - керамический изолятор; 2 - наружные металлические кольца; 3 - внутренние металлические кольца; 4 - корпус квадрупольной линзы; 5 - экран; 6 - горловина; 7 - электрический контакт; 8 - резонансный делитель напряжения; 9 - контактный лепесток; 10 - винт; 11 - шайба из силиконовой резины; 12 - фасонная гайка

Трубка откачивается паромасляными вакуумными агрегатами ВА-05 с азотными ловушками до давлений $(0,5-1,0) \cdot 10^{-5}$ тор.

В высоковольтном электроде ускорителя (поз. 5, рис. 1), кроме ионного источника и блоков его питания и стабилизации, размещены также баллоны с водородом, игольчатый натекатель, автотрансформатор накала термокатода источника, переключатель числа витков контура питания этих устройств. Диэлектрические штоки (см. поз. 10, рис. 1) управления термокатода и стабилизации имеют моторный привод, штоки установки натекателя и переключателя числа витков выставляются от руки перед включением установки.

Питание источника обеспечивает зажигание несамостоятельного дугового разряда в камере источника на время от 1 до 6 мсек на частоте 50 гц, что приводит к формированию соответствующих импульсов ионного тока. Система стабилизации ускоряющего напряжения, как и при ускорении электронов, за счет изменения потенциала управляющего электрода источника изменяет величину ионного тока таким образом, чтобы обеспечить постоянство ускоряющего напряжения. Форма кривой тока в этом случае полностью определяется динамическими характеристиками трансформатора и трубки [2].

На установке ПрТ были получены следующие режимы ускорения: 1) включена система стабилизации, энергия частиц 1,2 Мэв при разбросе $\pm 0,5\%$, максимальный

и средний токи 45 ма и 3,5 ма соответственно; 2) система стабилизации отключена, энергия частиц 1,2 Мэв при разбросе $\pm 10\%$, максимальный и средний токи более 60 ма и 9 ма соответственно. Во всех режимах длительность импульсов тока 2 - 5 мсек при частоте следования 50 гц. На коротких импульсах ~ 2 мсек были зарегистрированы максимальные токи до 80 ма.

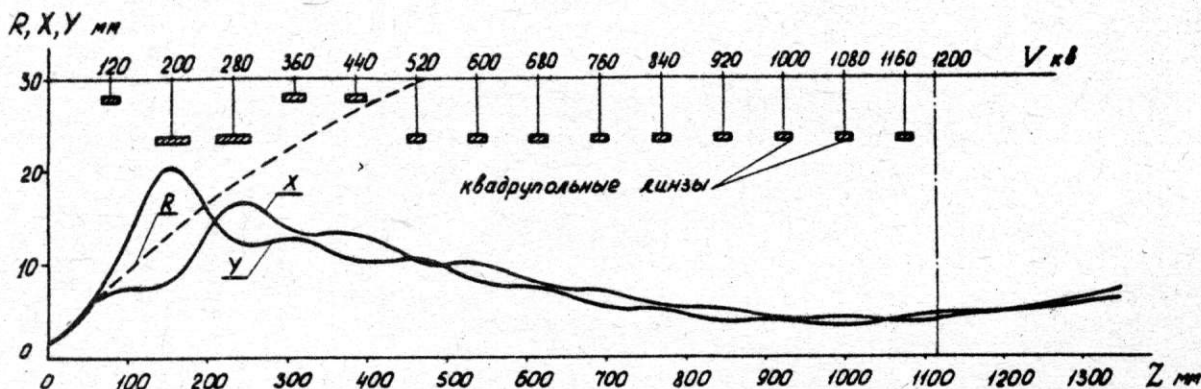


Рис. 3. Огибающие пучка в ускорительном канале: X, Y - огибающие в плоскостях xz и yz соответственно, R - огибающая при отключенной квадрупольной фокусировке

Предельные величины токов находятся в хорошем согласии с расчетом и подтверждают перспективность основных принятых решений. Главным направлением работ на опытном ускорителе ПрТ в настоящее время является уменьшение разброса энергии при предельных токах и повышение средней мощности пучка.

В заключение отметим, что на базе проведенных разработок могут быть построены сильноточные инжекторы протонов и установки для промышленной протонной технологии.

Возможности использования ускорителей трансформаторного типа для ускорения тяжелых ионов, создания тандемов с перезарядкой частиц и других целей рассмотрены в работе [11].

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамян Е.А., Гапонов В.А., Источник ускоренных частиц одинаковой энергии, авторск. свид. № 208144, Бюллетень изобретений № 3, 29, XII. 67.
2. Абрамян Е.А., Гапонов В.А., Атомная энергия, 20, 5, (1968).
3. Абрамян Е.А., Гапонов В.А., см. наст. сборник стр. 106.
4. Абрамян Е.А., Вечеславов В.В., Атомная энергия, 22, 5, (1967).
5. Калчинский И.М., Динамика частиц в линейных резонансных ускорителях, М., Атомиздат, 1966.
6. Абрамян Е.А., Вечеславов В.В., Кононов В.И., Предельные токи протонов в ускорительной трубке с жесткой фокусировкой, препринт ИЯФ СО АН СССР, Новосибирск, 1967.
7. Вечеславов В.В., Кононов В.И., Ионно-оптическое согласование методом случайного поиска, препринт ИЯФ СО АН СССР, Новосибирск, 1967.
8. Purser K.H. et al. Rev. Sci. Instr. 36, № 4, 453, (1965).
9. Вечеславов В.В., Кононов В.И., Атомная энергия, 25, 2, (1968).
10. Howe F.A. IEEE Trans. on Nucl. Sci. 14, № 3, 122, (1967).
11. Abramyan E.A. Nucl. Instr. and Meth, 59, 22, (1968).

75. ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЙ КАНАЛ НАКОПИТЕЛЯ ВЭПП-3

Т.А. Всеволожская, Г.И. Сильвестров, А.Н. Скринский (Институт ядерной физики СО АН СССР)

Накопитель ВЭПП-3 представляет собой жесткофокусирующую магнитную дорожку радиусом 8 м с двумя линейными промежутками по 12 м, в одном из которых производится инжекция электронов и позитронов. Ускоритель-инжектор расположен внутри накопительного кольца, и направление выпуска перпендикулярно направлению инжекции в накопитель (рис. 1).

Инжекция в накопитель ВЭПП-3 является однооборотной, т.е. впускаемый пучок вводится в камеру на краю апертуры параллельно равновесной орбите и через четверть периода бетатронных колебаний подвергается воздействию инфлектора, который гасит амплитуду его бетатронных колебаний. Одновременно инфлектор раскачивает ранее накопленный пучок, что ограничивает величину удара инфлектора и аксептанс накопителя.

Во избежание большой амплитуды раскачки накопленного пучка в накопителе ВЭПП-3 принят вариант инжекции с предварительным ударом накопленного пучка. Для этого за четверть периода бетатронных колебаний до места впуска помещается дополнительный инфлектор, который подводит накопленный пучок к ношу впускного магнита. Второй инфлектор, гася амплитуду колебаний впускаемого пучка, одновременно возвращает на равновесную орбиту основной пучок. Движение пучков на фазовой плоскости схематически показано на рис. 2,а.

Впуск частиц в накопитель ВЭПП-3 осуществляется по вертикали, и, очевидно, место впуска позитронов должно быть выбрано вблизи максимума аксиальной функции Флоке. В соответствии с этим позитроны инжектируются на входе во второй квадрупольный дублет промежутка (см. рис. 1), инфлекторы располагаются в первом и третьем дублетах. Чтобы между инфлекторами укладывалась половина волны бетатронных колебаний, центр первого инфлектора должен быть смещен относительно середины дублета на величину, составляющую 0,14 от длины инфлектора. В этом случае при отношении полей в инфлекторах $H_1/H_2 = 0,7$ осуществляется полное гашение предраскачки основного пучка (рис. 2,б).

В действительности полное отсутствие колебаний накопленного пучка не является обязательным. С хорошим запасом можно допустить остаточные колебания пучка с амплитудой, составляющей 1/3 от аксиальной апертуры камеры. Это позволяет увеличить удар второго инфлектора в 1,33 раза, что дает соответственное увеличение аксептанса. Смещение инфлектора оказывается несущественным (см.рис.2,б). Аксептанс в этом случае будет вдвое больше того, который может быть получен при захвате без предудара даже при раскачке основного пучка на 0,7 апертуры, и оказывается равным для камеры накопителя ВЭПП-3 $\sim 8,5$ мрад (см. рис. 3,а).

Конверсия электронов в позитроны происходит в вольфрамовой мишени толщиной в одну радиационную единицу длины. Эмиттанс позитронного пучка определяется среднеквадратичным углом выхода из конвертера позитронов заданной энергии и размером электронного пучка на конвертере, поскольку прирост координаты в конвертере пренебрежимо мал.

Среднеквадратичный угол выхода позитронов из конвертера обусловлен в основном многократным рассеянием электронов и позитронов и при энергиях электронов 500 Мэв и позитронов 250 Мэв составляет $\sqrt{\theta^2} = 0,04$ рад. Минимальный прирост поперечного фазового объема при конверсии электронов в позитроны достигается фокусировкой электронного пучка в пятно минимального размера при условии, что углы сходимости электронов остаются существенно меньше углов выхода позитронов [1].

В рассматриваемой схеме электроны фокусируются на конвертер в пятно размером менее 1 мм поворотным магнитом с радиусом 15 см и показателем спада поля $n = 0,5$. Для этой же цели может быть использована параболическая линза [2] с фокусным расстоянием 30 см.

Собирание позитронов с конвертера осуществляется линзой с фокусным расстоянием ~ 20 см, в качестве которой может быть использована параболическая линза. Кроме

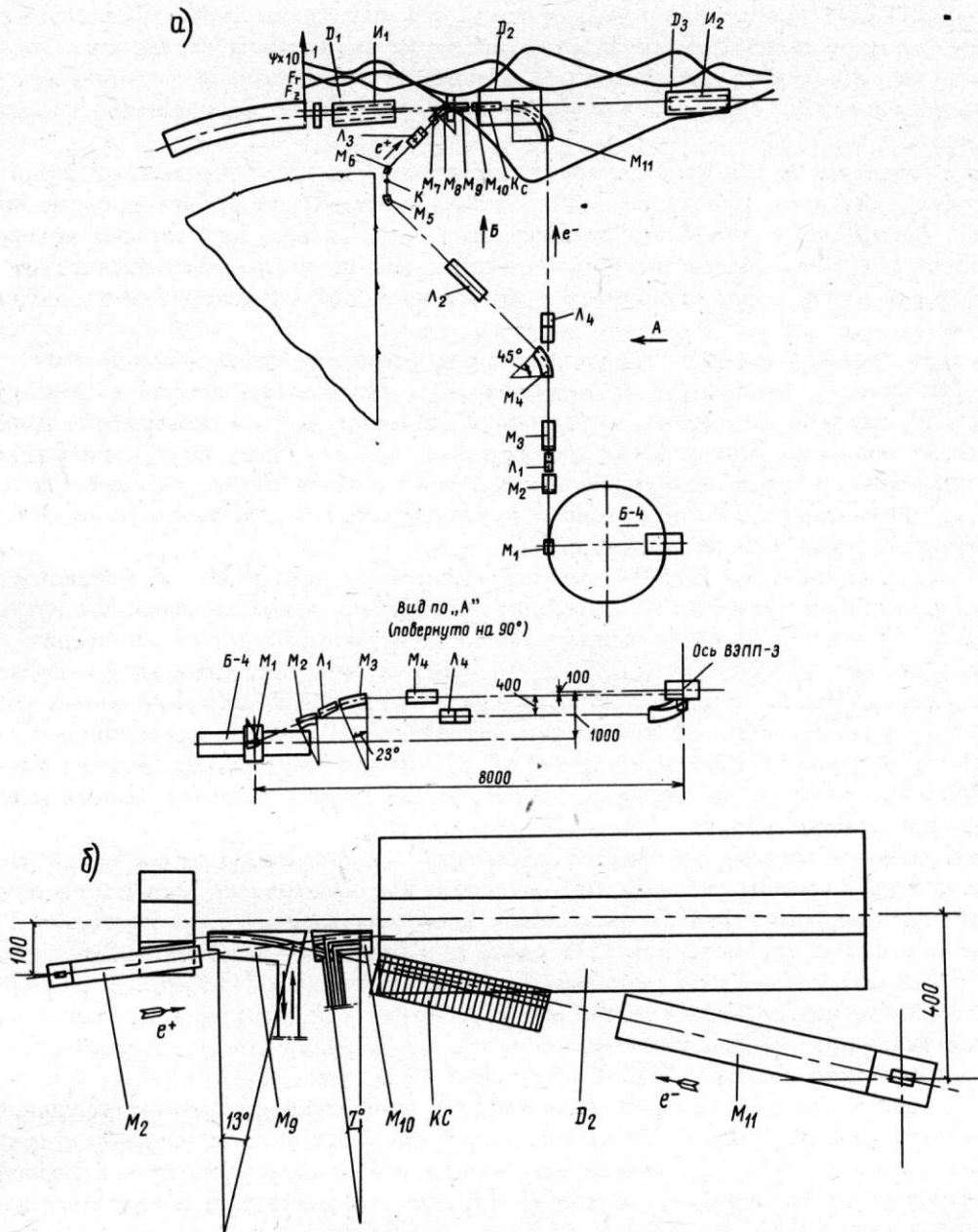


Рис. 1. Схемы (а) позитронного и электронного каналов ВЭПП-3 и (б) вертикального впуска в накопитель (вид по стрелке Б (рис. 1а) Б-4 - синхротрон-инжектор; ВЭПП-3 - накопитель; D_1, D_2, D_3 - квадрупольные дублеты промежутка накопителя; I_1 - инфлектор предудара; I_2 - основной инфлектор; Ψ, F_r, F_z - функция, радиальная и вертикальная функции Флоке линейного промежутка накопителя; К - конвертер; M_1 - выпускной септум - магнит синхротрона; M_2, M_3 - магниты параллельного подъема пучка на электронном и позитронном трактах соответственно; M_4 - поворотный магнит позитронного тракта; M_5 - короткофокусный магнит для фокусировки электронов на конвертер; M_6 - короткофокусный магнит, собирающий позитроны; M_7, M_8 - магниты подъема и поворота позитронов на вход накопителя; M_9, M_{10} - впускные септум - магниты электронного и позитронного трактов соответственно; M_{11} - поворотный магнит электронного тракта; L_1, L_2, L_3, L_4 - квадрупольные линзы; КС - компенсирующая система для проводки пучка через зазор квадрупольной линзы с постоянным полем

того, для этой цели разрабатывается магнит с радиусом 7,5 см, апертурой ± 1 см и полями $4 \cdot 10^5$ э, который без изменения оптической схемы соединит в себе функции и собирающей линзы и первого поворотного магнита.

Применение в блоке конверсии короткофокусных магнитов, удобно сочетающих поворот с фокусировкой, в значительной степени обусловлено геометрией трассы пучка, определяемой условиями оптимальной инжекции позитронов.

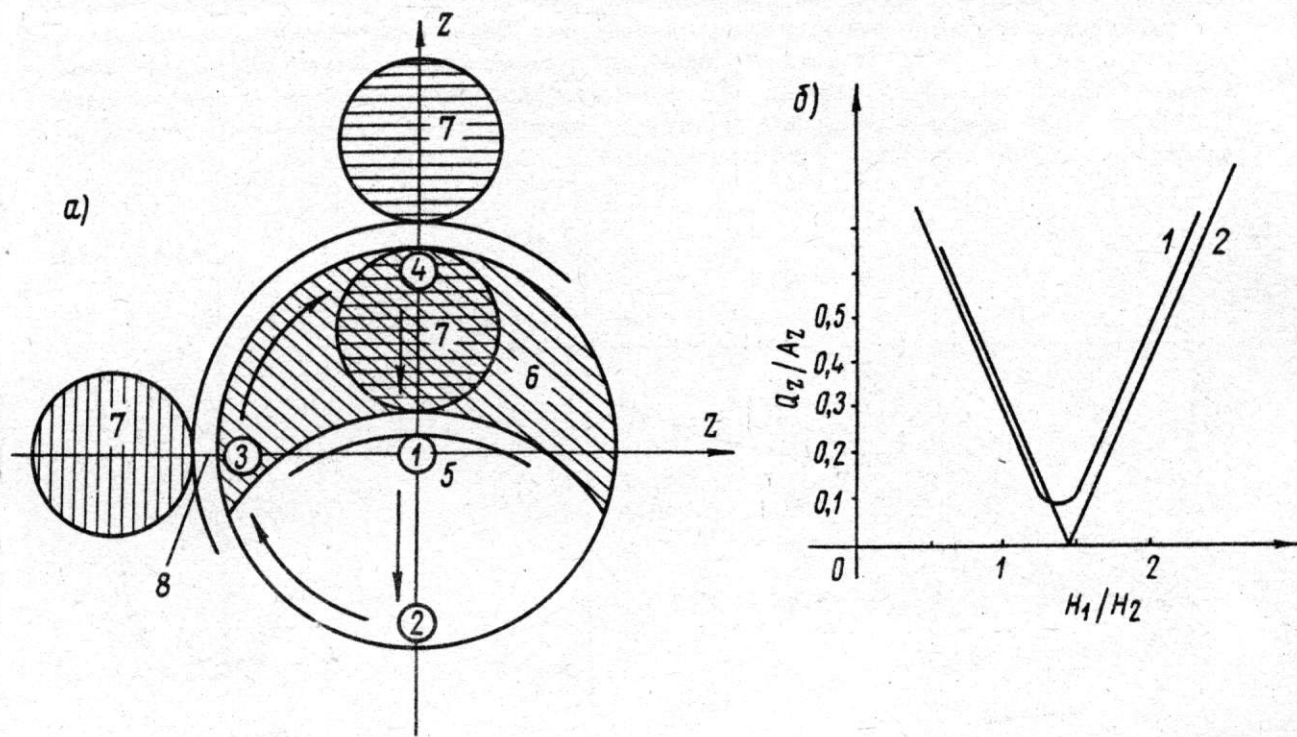


Рис. 2. а) Схема однооборотного захвата с предударом накопленного пучка: 1 - равновесное положение накопленного пучка; 2 - положение пучка после предудара; 3 - на азимуте инжекции; 4 - во втором инфлекторе; 5 - после удара второго инфлектора; 6 - аксептанс накопителя; 7 - впускаемый пучок; 8 - нож впускной системы. б) Амплитуда остаточных колебаний основного пучка в единицах апертуры в зависимости от соотношения полей в первом и втором инфлекторах для двух положений первого инфлектора: 1 - симметричное положение в 1-м дублете промежутка; 2 - сдвинутое вправо на 0,14 от длины инфлектора

Оптическая система канала, передающего пучок от собирающей линзы на вход накопителя в вертикальной плоскости, описывается матрицей $\begin{pmatrix} -1 & 0 \\ -3,7 \cdot 10^{-3} & -1 \end{pmatrix}$ т.е. имеет увеличение $U_z = -1$ и разворачивает поперечный фазовый объем пучка на угол $3,7 \cdot 10^{-3}$ рад/см, обеспечивая наилучшее вписывание эмитанса пучка в аксиальный аксептанс накопителя.

В радиальной плоскости условиями оптимальной инжекции являются, во-первых, согласование по форме эмитанса пучка с адмитансом накопителя; во-вторых, правильная корреляция между координатами и углами впуска частиц с неравновесной энергией и значениями Ψ - функции накопителя и ее производной в месте инжекции, благодаря чему частицы с любой энергией впускаются на свою орбиту в магнитном поле накопителя. При оптимальном напряжении на резонаторе выполнение этих условий обеспечивает в нашем случае эффективный захват частиц в энергетическом интервале $\pm 2\%$.

Для достижения энергетической корреляции поворот позитронного пучка в радиальной плоскости разбивается на два с углами φ_1 и φ_2 , связанными соотношениями:

$$\varphi_1 + \varphi_2 = \pi/2; \frac{\sin \varphi_1 \sqrt{1-n_1}}{\sqrt{1-n_1}} \frac{1}{U_r} + \frac{\sin \varphi_2 \sqrt{1-n_2}}{\sqrt{1-n_2}} = \frac{d\Psi}{da} = -0,653,$$

где $\frac{d\Psi}{da}$ - значение производной Ψ - функции по азимуту во впускном промежутке; n_1 и n_2 - показатели преломления поля в магнитах, равные $n_1 = 0,5$, $n_2 = 0$; $1/U_r$ - угловое увеличение линзы, стоящей между магнитами. Линза фокусирует пучок из центра первого магнита в центр второго, который находится на расстоянии 60 см от входа в накопитель и совпадает с нулем Ψ - функции накопителя. Увеличение линзы равно $U_r = -0,5$, и при углах поворотов магнитов $\varphi_1 = \varphi_2 = 45^\circ$ достигается энергетическая корреляция и по углу и по координате.

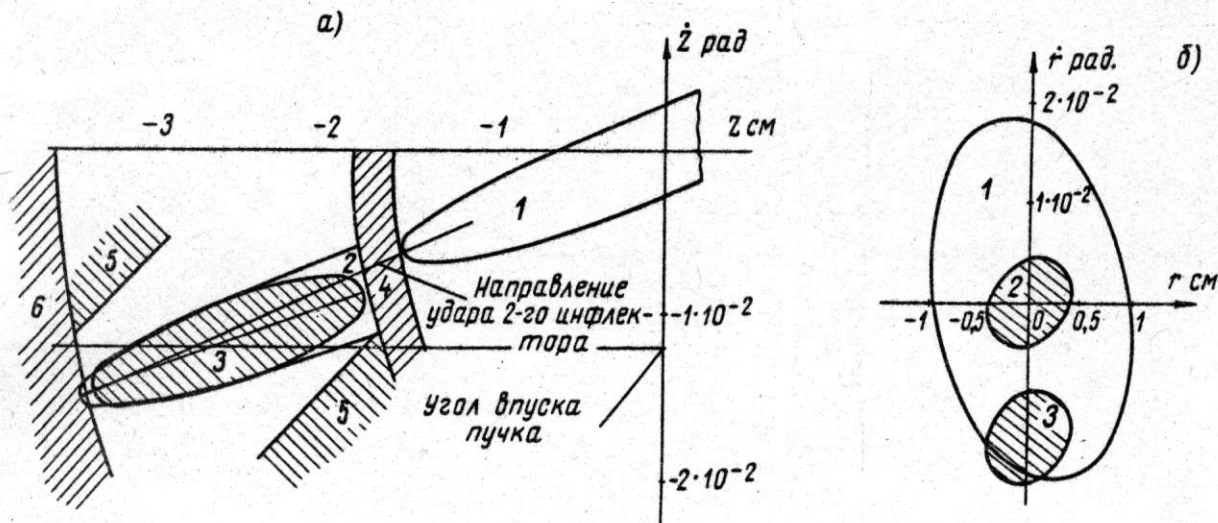


Рис. 3. а) Аксиальный акцептанс накопителя: 1 - адмитанс накопителя; 2 - акцептанс; 3 - эмиттанс позитронного пучка; 4 - нож впускной системы; 5 - апертура канала; 6 - нижняя стенка камеры накопителя. б) - Радиальный адмитанс накопителя в нуле Ψ - функции: 1 - адмитанс накопителя; 2 - эмиттанс пучка с равновесной энергией E_0 ; 3 - эмиттанс пучка с энергией $E_0 - \Delta E$ при $\frac{\Delta E}{E} = 2\%$

Первый из магнитов M_6 расположен непосредственно за собирающей линзой, так что в центре второго магнита M_8 получаем изображение пучка с выхода собирающей линзы, уменьшенное с коэффициентом 0,55 в соответствии с формой адмитанса накопителя.

Линза, фокусирующая пучок между магнитами, представляет собой симметричный триплет с длинами секций $l_1 = l_3 \approx 10$ см и $l_2 \approx 20$ см и одинаковыми градиентами во всех секциях. Фокусные расстояния триплета в вертикальной и горизонтальной плоскостях равны $F_z = 80$ см, $F_r = 45$ см. Развороты поперечных фазовых объемов пучка, пропорциональные $1/UF|_{r,z}$, компенсируются поворотными магнитами, которые играют роль полевых линз, что однозначно определяет их радиусы, равные $R_1 = R_2 = 60$ см.

Параллельный подъем позитронного пучка на высоту 10 см для впуска в накопитель осуществляется магнитами M_7 и M_{10} с углами 7 и 10° . Энергетической дисперсией при этом можно пренебречь из-за малости подъема и углов поворота.

Толщина внешней стенки ("нож") впускных магнитов M_9 и M_{10} не превышает 2 мм и уменьшает акцептанс накопителя на $\sim 10\%$.

Электронный пучок выпускается из синхротрона под углом 23° к горизонтали магнитом M_1 и после подъема на 90 см вводится в горизонтальную плоскость магнитом M_3 .

Параллельный перенос пучка в горизонтальной плоскости на расстояние 350 см осуществляется магнитами M_4 и M_5 с углами поворота 45° . Оптическая схема этой ча-

сти канала построена так, чтобы нестабильность энергии электронов в интервале $\pm 5 \cdot 10^{-3}$ и нестабильность координаты выпуска не приводили к смещению пучка на конвертере, а переходили в угловой разброс, малый по сравнению с углом выхода позитронов.

Фокусировка пучка при проводке по электронному каналу осуществляется дублетом L_4 и поворотным магнитом M_{11} с углом поворота 90° , направляющим пучок на вход в накопитель.

Для уменьшения энергетической дисперсии магнит разбит на две секции с углами поворота 37 и 53° и показателями спада $n_1 = 2$ и $n_2 = -1$.

В результате эмиттанс электронного пучка полностью вписывается в адмитанс накопителя при отклонении энергии от равновесной на величину $\pm 5 \cdot 10^{-3}$.

В заключение авторы выражают благодарность И.Я. Протопопову за плодотворное сотрудничество в вопросах согласования параметров канала с параметрами накопителя.

ЛИТЕРАТУРА

1 Г.И. Будкер и др., Доклад на Всесоюзном совещании по ускорителям со встречными пучками и физике частиц сверхвысоких энергий, Новосибирск, часть 1, 1964. стр. 95.

2. Л.Л. Данилов и др., ЖТФ, 37, 914 (1967).

76. ИНЖЕКЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В СИНХРОТРОН Б-4 *

В.И. Бобрик, В.В. Петров, Г.И. Яснов (Институт ядерной физики
СО АН СССР)

В ИЯФ СО АН СССР сооружается комплекс встречных электрон-позитронных пучков ВЭПП-3 [1]. Инжектором для этого накопителя предполагается использовать электронный синхротрон Б-4, который в своей конструкции подобен синхротрону Б-3М [2]. Его основные параметры: магнит С-образный с четырьмя прямолинейными промежутками по 4 см каждый, средний радиус 102 см, показатель спада поля $n = 0,4$, размер апертуры $\Delta R \times \Delta z = 14 \times 9$ см. Улучшение конструкции магнита позволяет ускорять электроны до энергии 450-500 Мэв, что соответствует полю 15-17 кгс.

Вначале предполагалось применить в синхротроне однооборотную инжекцию из импульсного линейного ускорителя [3], тем более, что такой ускоритель с энергией электронов 3,5 Мэв и током до 100 а в импульсе имеется и используется для получения позитронов [4]. Однако опыты на синхротроне Б-3М показали, что однооборотная инжекция из этого ускорителя имеет ряд недостатков. Во-первых, пучок с нужным энергетическим разбросом $\pm 0,5\%$ имеет длительность 15 нсек и заполняет только половину камеры по азимуту, и, во-вторых, на каждом азимуте имеются частицы только одной энергии. Обе эти причины могут ограничивать захватываемый ток из-за неустойчивостей в пучке.

В последние годы в институте были разработаны ускорители на основе трансформатора Тесла [5]. При сравнительно простой конструкции и системе питания такие ускорители позволяют иметь длинные пучки электронов. В последнее время получено напряжение до 3 Мв на ускорителе такого типа ЭЛИТ-3, ведутся работы по получению пучка электронов длительностью до 1,5 мксек с энергетическим разбросом частиц $\pm 0,5\%$.

Используя такой ускоритель, можно инжектировать электроны в синхротрон в течение 40-50 оборотов, т.е. осуществить инжекцию со спиральным накоплением частиц [6].

Рассмотрим метод инжекции с накоплением применительно к синхротрону Б-4. В один из прямолинейных промежутков синхротрона с наружного радиуса через впускной магнит вводится пучок электронов.

Ведущее поле выбирается так, чтобы равновесная орбита инжектируемых частиц была вблизи впускного магнита ("ножа" инжектора) и амплитуда бетатронных колебаний частиц была мала. Из-за разности частот обращения и бетатронных колебаний частицы проходят мимо "ножа" инжектора несколько оборотов ($\nu_r = 0,87$). В течение этого времени за счет действия специального "бетатронного" сердечника накопления, расположенного в другом прямолинейном промежутке, частицы изменяют энергию и, двигаясь по спирали, отходят от "ножа" инжектора, заполняя всю камеру. После окончания накопления включается ускорительный режим.

При таком способе инжекции пучок непрерывен по азимуту и имеет значительный (до 6%) энергетический разброс частиц, что уменьшает возможность появления некоторых неустойчивостей.

Для выбора оптимальных условий инжекции был сделан расчет зависимостей полного фазового объема пучка, захватываемого в ускоритель, от шага спирали и расстояния равновесной орбиты от наружной шины. Под полным фазовым объемом мы понимаем величину Φ

$$\Phi = N S_1, \quad (1)$$

где N - число оборотов, в течение которых происходит накопление, S_1 - фазовый объем пучка, захватываемый в каждом обороте. Число оборотов определяется из формулы

$$N = \frac{\Delta R - 2r_0}{\delta}, \quad (2)$$

где ΔR - радиальный размер вакуумной камеры ускорителя, r_0 - расстояние от равновесной орбиты в момент инжекции до наружной стенки, δ - шаг спирали. Для

выбранного размера впускного канала ($\Delta r = 12$ мм) и толщины стенки, отделяющей апертуру впускного магнита от камеры ускорителя, 2 мм зависимость полного фазового объема от шага спирали при $r_0 = 3$ см приведена на рис. 1. Для остальных значений r_0 кривые проходят ниже. Из рисунка видно, что максимальный фазовый объем захватывается при $r_0 = 3$ см и $\delta = 2$ мм. При этом с каждого оборота захватываются частицы в интервале координат $\pm 0,6$ см и углов $\pm 7 \cdot 10^{-3}$ рад. при общем наклоне пучка на входе в синхротрон $+8 \cdot 10^{-3}$ рад. Накопление ведется в течение 40 оборотов, что соответствует длительности пучка порядка 1,2 мксек.

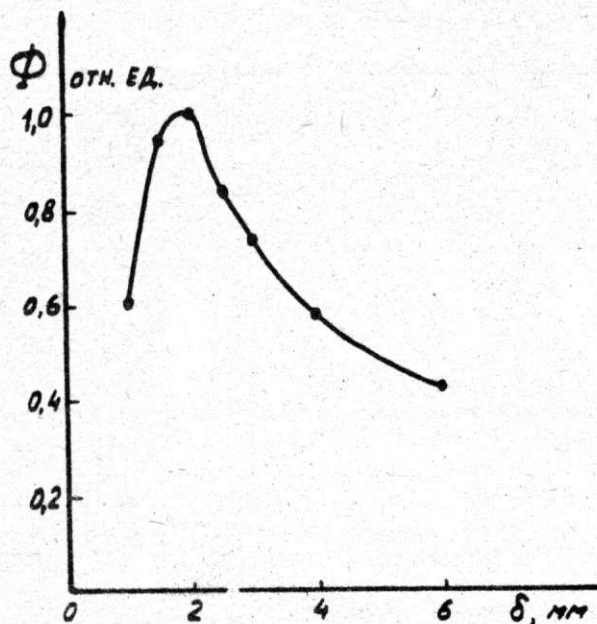


Рис. 1. Зависимость полного фазового объема от шага спирали

Расчет проведен для моноэнергетического пучка без учета действия пространственного заряда. При энергии 3 Мэв и токе в пучке порядка 1а действием пространственного заряда можно пренебречь, хотя после накопления ток в синхротроне должен быть уже порядка 20а или больше.

Учет энергетического разброса частиц в пучке приводит к уменьшению полного тока, захватываемого в ускоритель, на 10%.

Пучок из инжектора выходит вниз, поэтому для перевода пучка в синхротрон требуется произвести два поворота на 90° в разных плоскостях. Из-за энергетического разброса частиц происходит искажение фазового объема пучка, поэтому была рассчитана ахроматическая система транспортировки пучка. Каждый поворот на 90° осуществляется двумя магнитами с согласующей линзой между ними. Для согласования двух этих поворотов применена третья линза. Такая оптическая система может обеспечить транспортировку пучка с различным увеличением по углу или координате.

Так как по оценкам фазовый объем пучка, получаемого из инжектора, может быть сделан равным фазовому объему, захватываемому в синхротрон на каждом обороте, то система была сделана с увеличением, равным 1. Поэтому каждый поворот на 90° осуществляется двумя магнитами по 45° . На рис. 2 приведена схема электронно-оптического канала и основные размеры. Для поворота используются одновитковые магниты с равновесным радиусом $R_0 = 90$ мм и показателем спада поля $n = 0,5$, а для фокусировки—двойные аксиально-симметричные линзы.

Запуск синхротрона Б-4 с этим инжектором планируется на конец 1968 г.

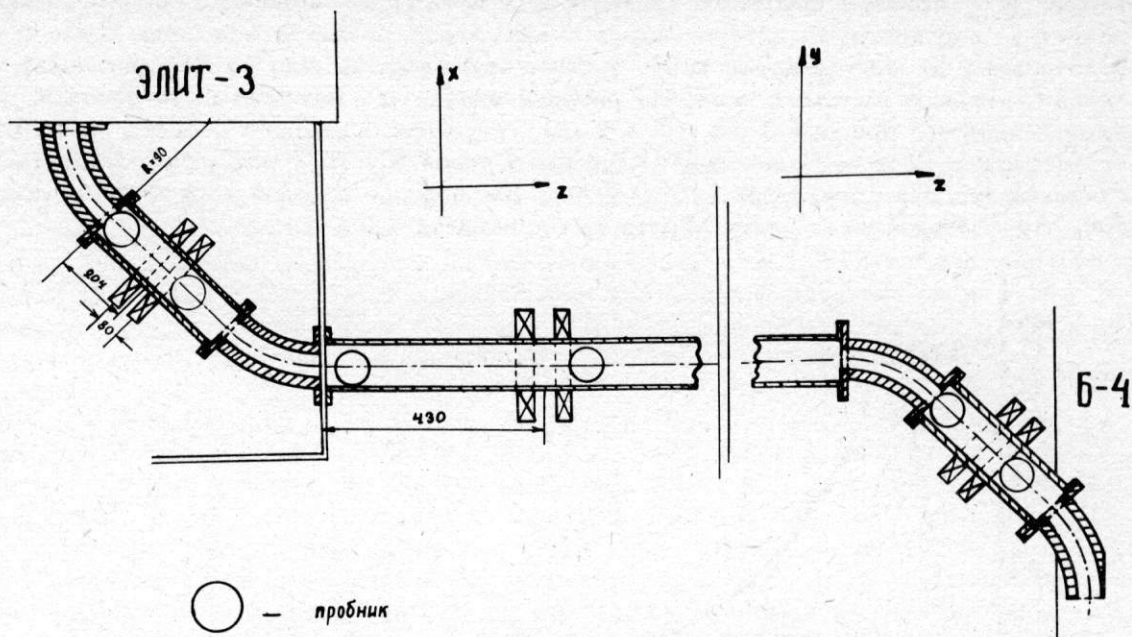


Рис. 2. Электронно-оптический канал между ЭЛИТ-3 и синхротроном Б-4

ЛИТЕРАТУРА

1. Будкер Г.И. и др. Доклад на Международной конференции по ускорителям, Кембридж, 1967.
2. Будкер Г.И. и др. Труды Международной конференции по ускорителям. Дубна, 1963г. М. Атомиздат, 1964, стр. 1071-1072.
3. Гриц Ю.А. и др. Труды Международной конференции по ускорителям. Дубна, 1963 г. М., Атомиздат, 1964, стр. 1080-1084.
4. Будкер Г.И. Атомная энергия, 19, 6, 497 (1965).
5. Абрамян Е.А., Вассерман С.Б. Атомная энергия, 23, 1, 44-45 (1967).
6. Самойлов И.Н., Соколов А.А. ЖТФ, 34, 6, 1057-1072 (1964).

В.Н. Пакин, Г.И. Сильвестров, Э.М. Трахтенберг (Институт ядерной физики СО АН СССР)

С развитием техники впуска и выпуска заряженных частиц из ускорителей все чаще находят применение так называемые септум - магниты, рабочая апертура которых отделена от рабочей апертуры ускорителя тонкой стенкой [1]. Эта стенка играет роль экрана, устраняя возможное возмущение движения частиц в ускорителе импульсным внешним полем магнита, и с этой точки зрения должна иметь большую толщину. Кроме того, в случае однооборотного впуска стенка определяет требования к инфлектору, который должен забрасывать пучок на толщину стенки плюс собственный размер пучка, и с этой точки зрения она должна иметь малую толщину. Применение же сильных магнитных полей в септум - магнитах приводит к появлению больших пондеромоторных сил, предъявляющих высокие требования к механической прочности стенки при минимальных деформациях.

Наиболее простым совместным решением этих вопросов является переход к импульсам питающего магнит тока значительно более коротким, чем период собственных колебаний стенки, поскольку при этом уменьшаются как максимальный прогиб стенки, так и предельные напряжения в материале стенки [2] по сравнению со статической [3]. Внешние поля магнита при заданной толщине стенки линейно уменьшаются с длительностью импульса [1].

В нашем докладе рассматриваются вопросы динамической деформации стенки под действием импульсного магнитного поля, а также конструкции и варианты питания септум - магнитов.

При решении задач о динамических деформациях упругих систем вводится коэффициент динамичности $k_{\text{дин}}$ - отношение максимальных прогибов и напряжений под действием ударной и статической сил одинаковой величины [2]. Легко показать, что для случая импульсного магнитного поля $B \sin \frac{\pi t}{\tau_{\text{и}}}$ и соответственно давления

$$B^2 \sin^2 \frac{\pi t}{\tau_{\text{и}}} \quad (1)$$

при длительности импульса $\tau_{\text{и}}$ меньше полупериода собственных колебаний стенки $k_{\text{дин}} = \sin \frac{\omega \tau_{\text{и}}}{2}$, где ω - собственная частота колебаний стенки.

Таким образом, для расчета динамических деформаций и напряжений достаточно знать статические деформации и напряжения, а также собственные частоты колебаний стенки.

Например, в случае квадратной мембраны со стороной l и толщины Δ первая гармоника собственных колебаний при жестком закреплении по контуру $\omega \sim \frac{\Delta}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\gamma}}$, (E - модуль Юнга, γ - плотность вещества мембраны), а статические максимальные прогиб и напряжение на контуре под действием давления B^2 , постоянного по всей площади мембраны

$$x_{\text{стат}} \sim \frac{B^2 l^4}{E \Delta^3}, \quad \sigma_{\text{стат}} \sim B^2 \left(\frac{l}{\Delta} \right)^2.$$

При $\omega \tau_{\text{и}} \ll 1$, получим

$$x_{\text{дин}} \sim \frac{B^2 \tau_{\text{и}}}{\sqrt{E \gamma}} \left(\frac{l}{\Delta} \right)^2, \quad \sigma_{\text{дин}} \sim \frac{B^2 \tau_{\text{и}}}{\Delta} \sqrt{\frac{E}{\gamma}},$$

откуда однозначно следует, что особенно выгодно работать в динамическом режиме при больших размерах мембраны, ибо это соответствует большим периодам собственных колебаний мембраны и малому коэффициенту динамичности.

На рис. 1 приведена плоская модель септум - магнита, на которой проводились экспериментальные исследования движения стенки под действием ударных пондеромоторных сил (1). Модель состоит из корпуса 2 и центральной шины 1. Корпус 2, в

нижней части которого расположена стенка с минимальной толщиной $\Delta = 2$ мм, изготовлен из цельного куска закаленной бронзы БРХ-0,5, имеющей твердость по Бринеллю 100 единиц. Выходное отверстие модели 16×10 мм. Подвод тока и крепление шин см. ниже (рис. 3).

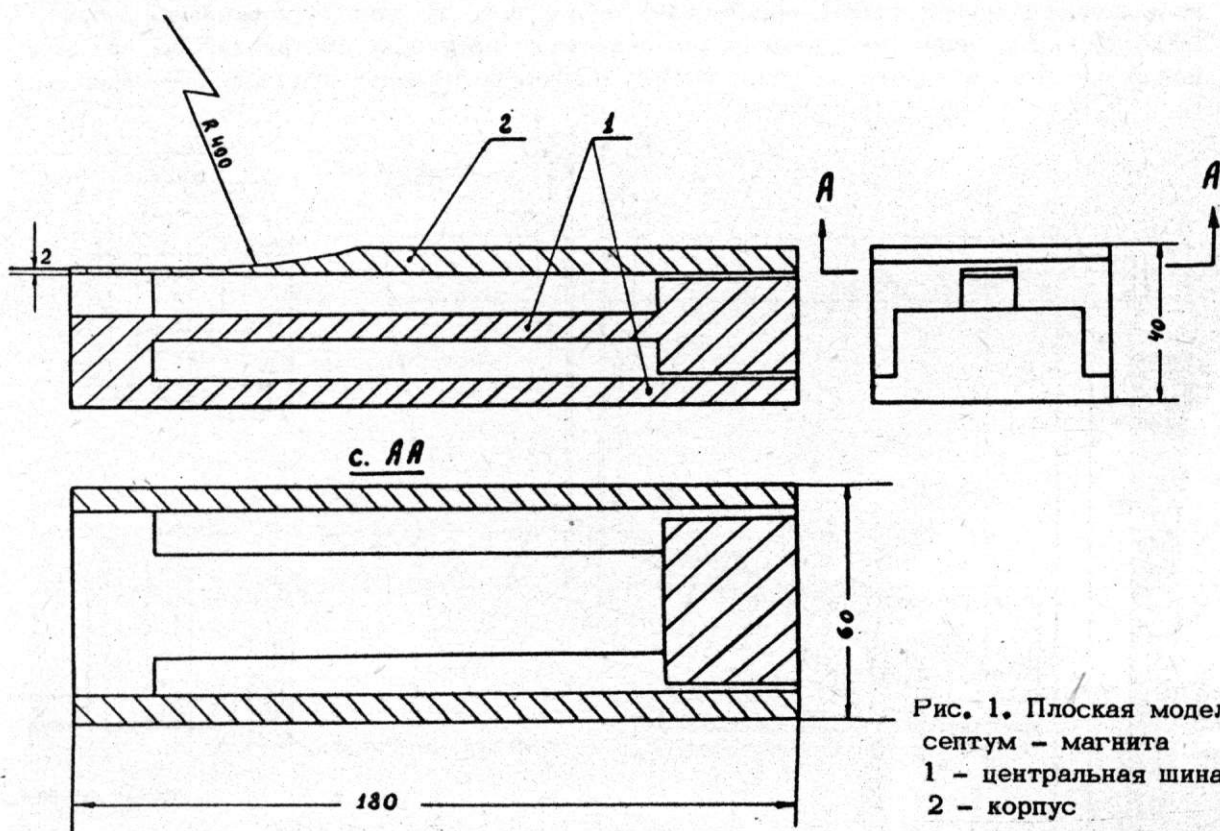


Рис. 1. Плоская модель септум - магнита
1 - центральная шина;
2 - корпус

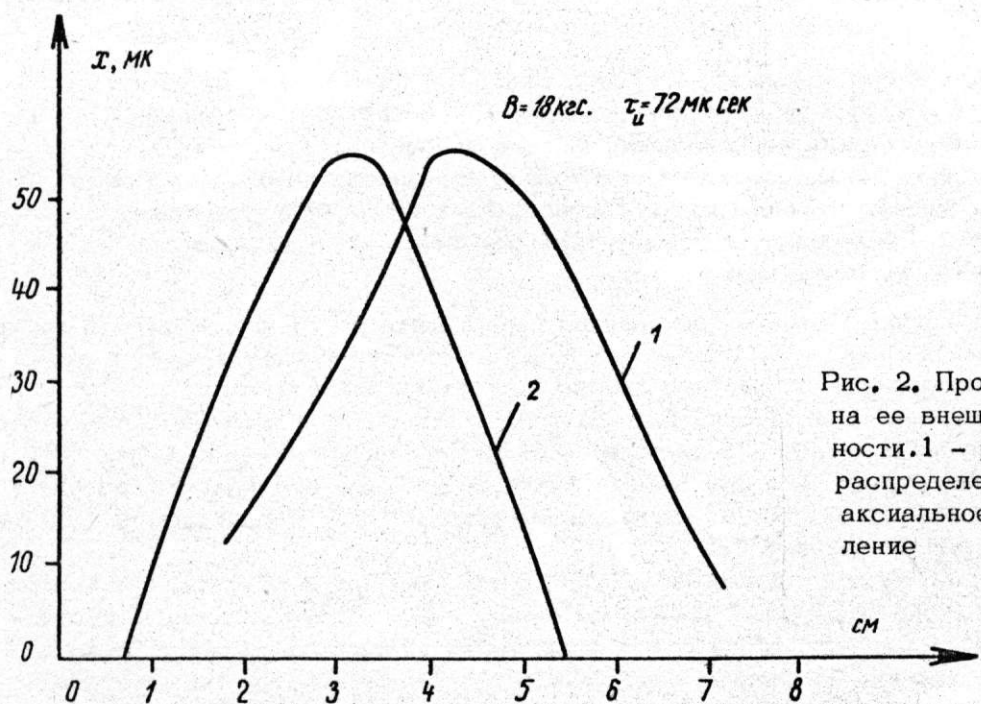


Рис. 2. Прогиб стенки на ее внешней поверхности. 1 - радиальное распределение; 2 - аксиальное распределение

С помощью механического индикатора и контактирующей иглы было измерено пространственное распределение прогиба по поверхности стенки при $\tau_i = 72$ мксек (рис. 2), линейная зависимость прогиба от длительности импульса при

$$\tau_i \ll \frac{2\pi}{\omega}$$

и квадратичная зависимость его от поля B . Из рис. 2 определяется характерный размер поля деформации $4,6 \times 5,0$ см, что соответствует [2] расчетному периоду собственных колебаний 200 мксек.

Период собственных колебаний стенки был определен экспериментально с помощью проволочного тензодатчика, наклеенного на поверхность стенки, и оказался равным 200 мксек. При этом логарифмический декремент затухания составляет 0,1 сек, т.е. после одиночного короткого удара стенка подвергается многократным деформациям.

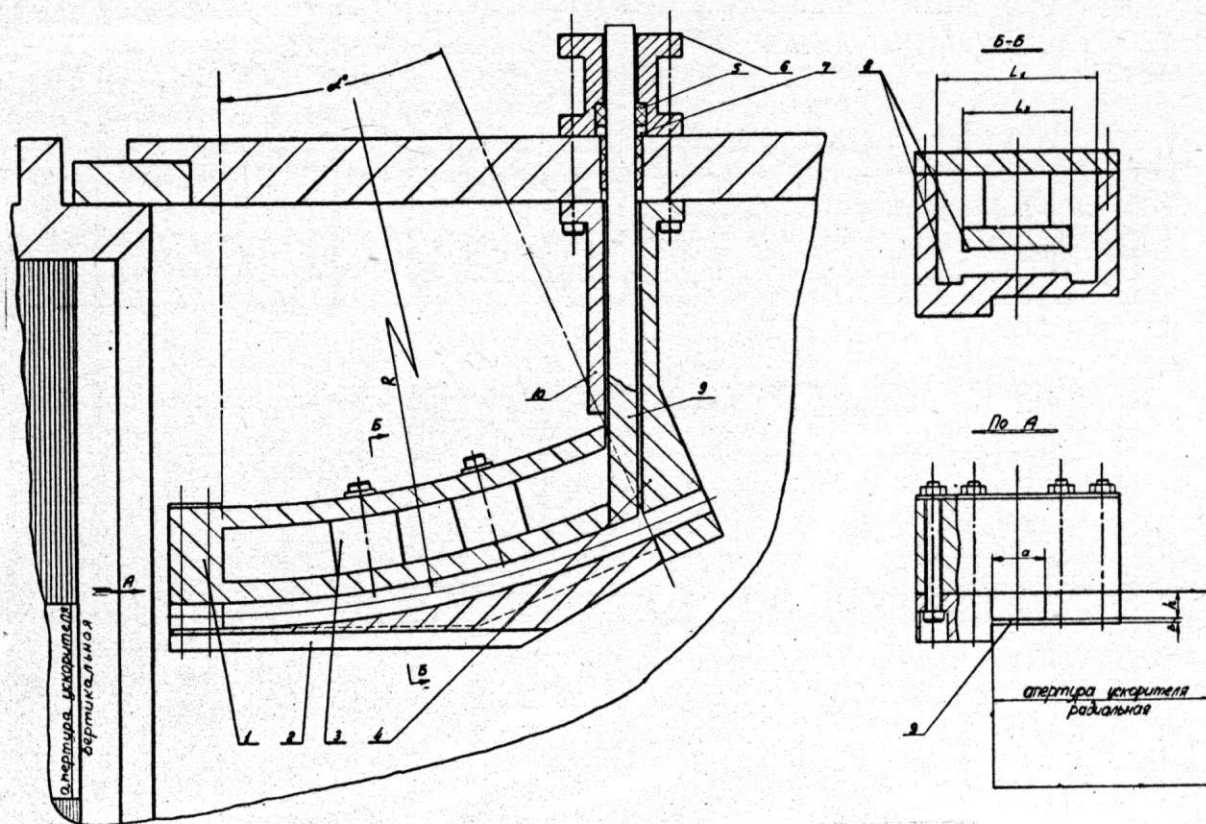


Рис. 3. Септум - магнит. 1 - блок шин; 2 - корпус; 3 - изоляторы; 4 - наружная шина токоподвода; 5 - изолятор токоподвода; 6 - внешняя шина коаксиальной части токоподвода; 7 - уплотнение; 8 - шиммирующие пазы и зубья; 9 - центральная шина токоподвода; 10 - крышка токопровода. $R = 500$ - радиус магнита, $a = 25$ - аксиальная апертура магнита, $h = 12$ - радиальная апертура магнита

Максимальный прогиб стенки при поле на поверхности ее 35 кгс и $\tau_{\text{и}} = 72$ мксек оказался равным 0,2 мм, что с точностью 20% согласуется с расчетом. При этом максимальные напряжения на контуре стенки составляют 4000 кг/см².

На основе модельных испытаний был сконструирован септум - магнит, предназначенный для выпуска электронов с энергией 450 Мэв из синхротрона Б-4 (рис. 3). При радиусе синхротрона 1 м для вывода пучка за рабочую апертуру ускорителя в пределах линейного промежутка 46 см мы применяем магнит с радиусом $R = 50$ см, полем 30 кгс и углом поворота 23° .

Магнит состоит из двух основных деталей: блока шин 1 и корпуса 2, выполненного из цельного куска закаленной бронзы БРХ-0,5, как и корпус модели. Для обеспечения надежного контакта блока шин 1 с корпусом 2 внутренняя шина блока в месте контакта развита до ширины корпуса и притянута 8 болтами М8. Наружная шина крепится к корпусу по всей длине.

Внутренняя шина токоподвода 9 припаяна к внутренней шине блока, а наружная шина токоподвода 4 крепится к корпусу и наружной шине блока шин посредством 10 болтов М6. Токоподвод к магниту представляет собой плоский коаксиал, образованный внутренней шиной 9, наружной шиной 4 и крышкой 10. Для уменьшения деформации внутренней шины блока под действием магнитного поля она крепится к наружной шине

через изоляторы 3. С целью уменьшения ширины L_2 внутренней шины до 5 см при заданной вертикальной апертуре магнита h произведено шиммирование внутренней шины и корпуса.

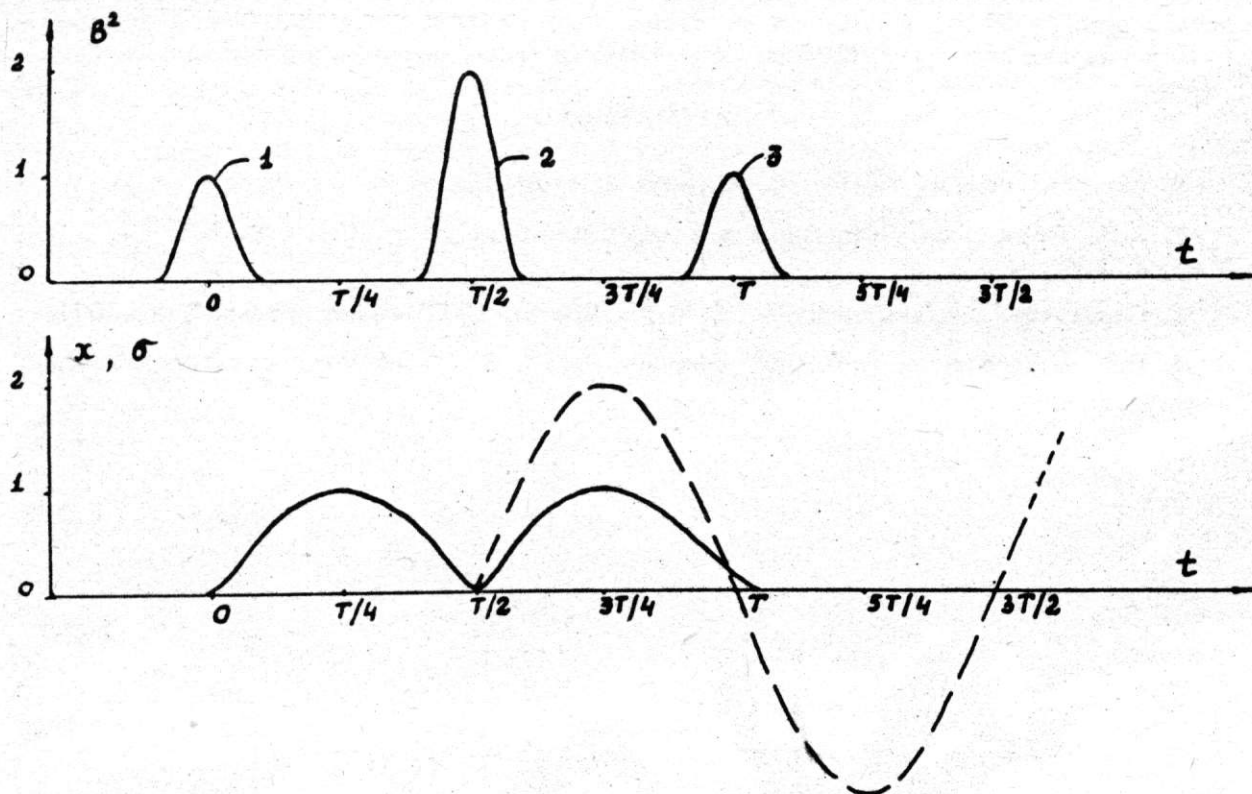


Рис. 4. Временные диаграммы. Вверху – распределение во времени удара раскачки 1, основного удара 2 и удара гашения 3. Внизу – распределение во времени прогиба стенки x и напряжения на контуре стенки σ под действием ударов 1,2,3 (сплошная кривая) и одиночного удара 2 (штриховая кривая)

Поскольку выпуск электронов производится в левом верхнем углу апертуры ускорителя, закрепление тонкой стенки выполнено несимметрично, что приводит к повышению прочности стенки. Размер выходного отверстия $2,5 \times 1,2 \text{ см}^2$, толщина стенки 2 мм.

Из рис. 3 и рис. 1 видно, что характерные размеры стенки у магнита и модели одинаковы: $l = 5 \text{ см}$, $\Delta = 0,2 \text{ см}$, поэтому магнит должен работать при $\tau_{\text{и}} = 70 \text{ мксек}$. (коэффициент динамичности $k_{\text{дин}} = 0,85$) и поле $B = 30 \text{ кгс}$.

Для уменьшения в два раза предельных прогибов и напряжений на контуре стенки можно использовать предварительный удар раскачки, имеющий в два раза меньшую величину по сравнению с основным ударом, и фазированный таким образом, чтобы деформация под его действием была направлена против деформации от основного удара.

Кроме того, вследствие малости декремента затухания ($\sim 0,1 \text{ сек}$), каждому одиночному удару импульсного поля соответствует несколько тысяч колебаний стенки. Поэтому с целью увеличения долговечности стенки при режимах, близких к предельному по прогибам и напряжениям в материале, необходимо гасить свободные колебания стенки после прохождения импульса рабочего тока с помощью специального импульса гашения.

На основе этих представлений в настоящее время нами разрабатывается система питания септум – магнита, работу которой можно понять из рис. 4. По оси абсцисс отложено время в периодах T собственных колебаний стенки, по оси ординат: вверху – удар раскачки 1, основной удар 2 и удар гашения 3; внизу – прогиб x и напряжения в материале σ под действием этих ударов (сплошная кривая), а также x и σ под действием одиночного удара 2 (штриховая кривая).

Система питания будет давать импульсы длительностью 35 мксек ($k_{\text{дин}} = 0,5$) и представляет собой накопительные емкости, малоиндуктивный согласующий трансформатор и управляемые вентили, описанные в докладе [4] на настоящем совещании. Разработка такой системы позволит нам обеспечить надежную работу септум - магнита в режиме 30 кгс и получить на таком магните 50 кгс при предельных деформациях и напряжениях ($x = 0,2$ мм, $\sigma = 4 \cdot 10^3$ кг/см²), достигнутых на модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Атомная энергия 1966 г., т. 22, вып. 3, стр. 210.
2. С.П. Тимошенко. "Колебания в инженерном деле", стр. 104, стр. 426, Москва, 1967 г.
3. Справочник машиностроителя т. 3, гл. 5, стр. 190. "Машиностроение", М. 1964.
4. Б.Ф. Баянов и др. настоящий сборник, стр. 283. "Генератор импульсов тока..."

98. ИЗМЕРЕНИЕ МГНОВЕННОГО ЗНАЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВОГО ВОЛЬТМЕТРА

В.Н. Пакин, А.П. Панов (Институт ядерной физики СО АН СССР)

Для измерения мгновенного значения импульсного магнитного поля чаще всего используются индукционные датчики-катушки с электронными или RC-интеграторами, при этом производится измерение мгновенного значения напряжения на емкости. В нашей схеме происходит точное запоминание мгновенного значения на емкости RC-интегратора, благодаря применению транзисторов в ключевом режиме в сочетании с быстродействующим реле, и последующее измерение его с помощью цифрового вольтметра. При этом транзистор обеспечивает точность индикации момента запоминания ~50 нсек, а реле позволяет практически устранить действие нулевых токов транзистора.

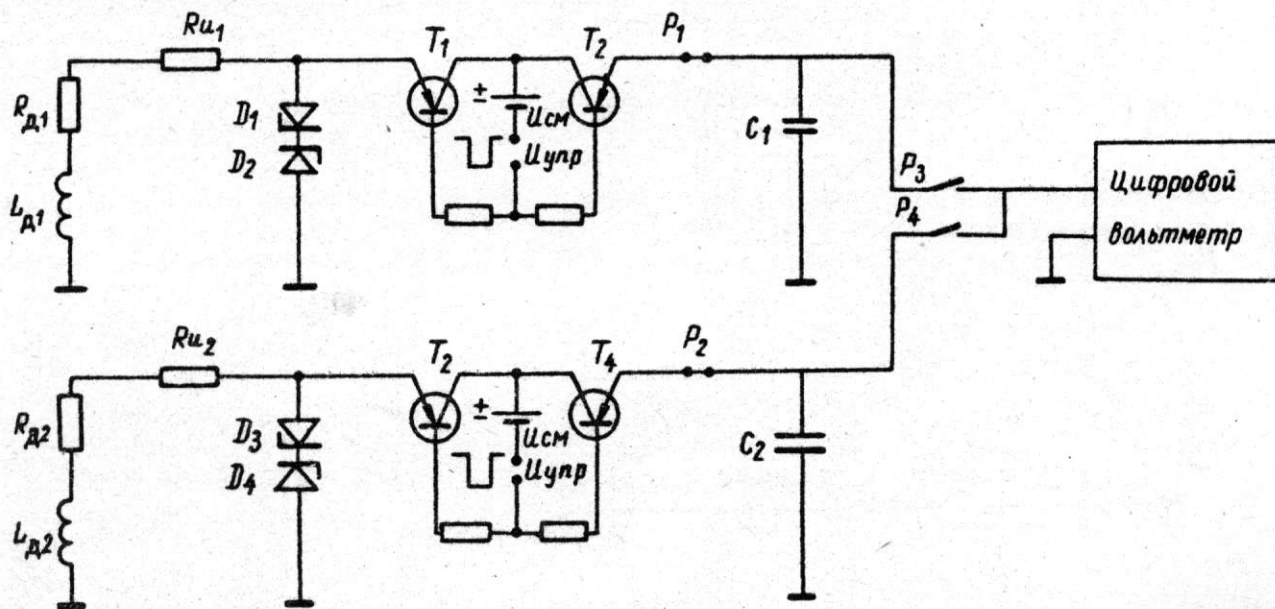


Рис. 1. Схема прибора $L_{д1}, L_{д2}$ - измерительные датчики; $R_{д1}, R_{д2}$ - сопротивления датчиков; $R_{и1}, R_{и2}$ - сопротивления интеграторов $10 \div 50$ ком; $D_1 \div D_4$ - кремниевые стабилитроны защиты; $T_1 \div T_4$ - транзисторы типа МП13Б; $P_1 \div P_4$ - контакты магнитоуправляемых реле; C_1, C_2 - емкости памяти $0,1 \text{ мкф} \div 1,0 \text{ мкф}$ (МПГТ); $U_{см}$ - источник смещения

Схема приведена на рис. 1 и состоит из двух каналов памяти. Это удобно как при проведении измерений градиентов магнитного поля, так и в случае работы с одиночными датчиками, поскольку один из каналов можно использовать для датчика привязки к величине поля, тем самым резко понизив требования к стабильности поля от импульса к импульсу. Для упрощения на рис. 1 не приводится полная схема синхронизации и запуска цифрового вольтметра.

Рассмотрим работу первого канала. В исходном состоянии триоды T_1 и T_2 открыты, контакты реле P_1 замкнуты, а емкость C_1 разряжена, контакты реле P_3 разомкнуты. Сигнал с датчика $L_{д1}$, пропорциональный производной поля, интегрируется на сопротивлении $R_{д1} + R_{и1} + R_{T1} + R_{T2}$ и емкости C_1 (рис. 2). В заданный хронизатором момент времени t_1 на триоды подается запирающее напряжение управления, и мгновенное значение напряжения на емкости C_1 запоминается. Одновременно хронизатор дает сигнал на реле P_1 , которое в момент времени t_2 отсоединяет емкость C_1 от триодов, устраняя воздействие их нулевых токов и нелинейного обратного сопротивления. Совершенно аналогично работает второй канал памяти.

После запоминания хронизатор последовательно дает сигналы на управление реле опроса каналов P_3 и P_4 и на своевременный запуск цифрового вольтметра, а

Б158

затем приводит всю схему в исходное состояние. Показания вольтметра отсчитываются визуально или выводятся на цифропечать.

Стабилитроны D_1 и D_2 служат для защиты триодов T_1 и T_2 от перенапряжений в момент размыкания, поскольку сигналы с датчиков составляют по величине десятки и сотни вольт, что соответствует напряжению на емкости от 1 в до 10 в.

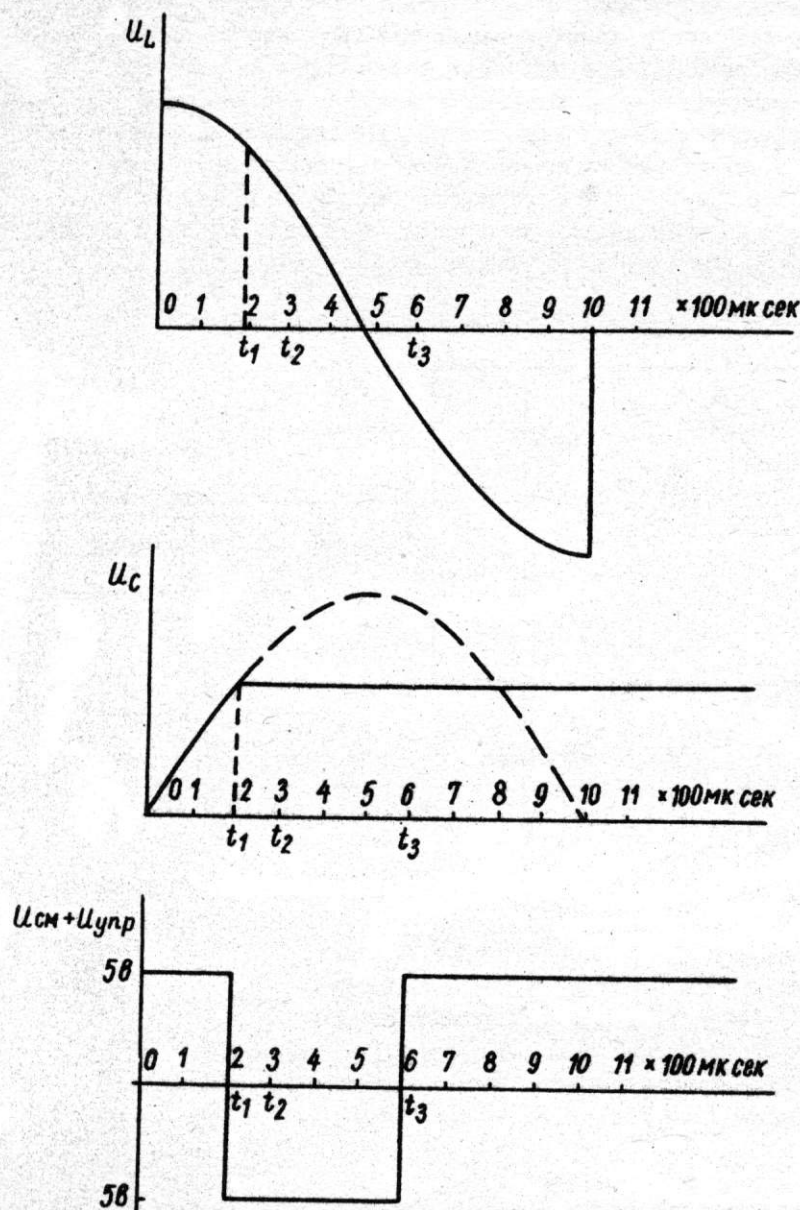


Рис. 2. Временные диаграммы U_L - напряжение на датчике; U_C - напряжение на емкости интегратора (памяти); $U_{СМ}$ и $U_{упр}$ - напряжения управления триодами ключа

Особенностью такой схемы является изоляция цепей управления от земли, что достигается с помощью изолированных источников смещения и широкополосных импульсных трансформаторов, передающих фронт запирающего импульса 50 нсек, и поддерживающих с точностью 10% запирающее напряжение в течение 300 мксек. Цепи управления имеют паразитную емкость на землю 50 пф, и на рабочей емкости 0,1 мкф сигнал от них составляет 0,5 мв при амплитуде управляющего напряжения 10 в.

В случае триодов МП13Б мы применяли инверсное включение [1], при котором сопротивление открытого транзистора составляет $1 \div 2$ ома в интервале коммутируемых токов $0 \div 40$ ма. Минимальный ток управления одного транзистора в этом случае составляет 30 ма. Эффективное сопротивление утечки триодов ключа в разомкнутом состоянии 4 мгом при запирающем напряжении 5 в и напряжении на емкости C_1 от 1 в до 10 в.

В качестве реле $P_1 \div P_4$ применяются герконы типа КЭМ, отдельные экземпляры которых имеют время отрыва контактов 100 мксек, а время замыкания - 300 мксек при большом числе срабатываний (10^6). Благодаря такому быстрдействию реле P_1 и P_2 утечка через триоды ключа приводит к уменьшению напряжения на емкости C_1

на 2 мВ при уровне 10 в и 0,2 мВ на уровне 1 в. Сопротивление утечки контактов реле и емкости составляет $5 \cdot 10^9$ ом, что дает абсолютную ошибку 0,02% при запоминании на емкости 1 мкФ в течение 1 сек.

Другая особенность такой ключевой схемы состоит в зависимости момента запира-ния триодов от коммутируемого через них тока при заданном токе управления. За-держка запираения относительно фронта управляющего напряжения плавно меняется от 1,5 мксек до 0,5 мксек в диапазоне токов $0 \div 50$ ма. Этот эффект не входит в зада-чу при измерении близких по величине сигналов на обоих каналах и дает легко учиты-ваемую стационарную ошибку в случае, когда сигналы отличаются на порядок (1в и 10в) в начальных фазах измеряемого поля (например, момент $t_1 = 100$ мксек при длительности импульса 1 мсек).

Схема в целом термостабилизируется.

При измерениях применялся цифровой вольтметр типа В7-8, имеющий малое вход-ное сопротивление 2 мгом и большую длительность цикла измерения 20 мсек. Графи-чески легко показать, что поскольку входное напряжение в этом вольтметре преобра-зуется в двуполярное симметричное напряжение и сравнивается с таким же симмет-ричным пилообразным опорным напряжением, линейность измерения сигнала на ем-кости памяти $0,1 \div 1,0$ мкФ сохраняется с точностью 0,01% в интервале $1 \div 10$ в, несмотря на быструю разрядку через входное сопротивление вольтметра в процессе измерения. При этом абсолютная ошибка составляет 0,5% при емкости 1 мкФ и 5% при емкости 0,1 мкФ.

Калибровка прибора с помощью одного сигнала, подаваемого на вход обоих кана-лов памяти, показала, что они идентичны с точностью $1 \div 2$ мВ в интервале измеряе-мых напряжений $1 \div 10$ в при вариации момента измерения от 100 мксек до 800 мксек.

Калибровка с помощью компенсационного метода показала линейность каждого ка-нала с точностью $\pm 0,15\%$ в том же интервале величин напряжений и моментов изме-рений.

Разработка этого прибора привела к возможности создания многоканальной схемы памяти, которая в сочетании с быстродействующей цифроречью позволит снимать пространственное распределение мгновенного значения магнитного поля даже при оди-ночном импульсе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Э.Ю. Гонестас. Вопросы радиоэлектроники, 1967, серия РТ, вып. 6, стр. 136.

Б.В. Левичев, А.С. Медведко, И.Я. Протопопов, А.Н. Скринский (Институт ядерной физики СО АН СССР)

Для успешной работы накопителя требуется провести магнитные измерения с точностями: для поля $\Delta H/H \leq 0,1\%$, для градиента $\Delta(\nabla H)/\nabla H \leq 0,2\%$ для квадратичной нелинейности $\Delta(H^2)/H \leq 3 \cdot 10^{-4} \text{ 1/см}^2$, для кубичной $H^3/H \leq 10^{-3} \text{ 1/см}^3$; длины отдельных элементов должны быть замерены с точностями не хуже 0,5 - 1,0 мм.

Для измерения поля использовался блок из шестнадцати пленочных датчиков Холла, равномерно расположенных по поперечному сечению $6 \times 3 \text{ см}^2$ используемой области поля. С помощью автоматической системы измерений [1] напряжения с этих датчиков заносятся на перфоленду для последующей обработки на ЭВМ.

Обработка заключалась в разложении магнитного поля по мультиполям относительно равновесной орбиты. Общий вид такого разложения, удовлетворяющего уравнениям Максвелла для плоской задачи, есть:

$$H_x(x, z) = a_0 + a_1 x + b_1 z + a_2 (x^2 - z^2) + b_2 (2xz) + a_3 (x^3 - 3xz^2) + b_3 (3x^2z - z^3) + \dots$$

$$H_z(x, z) = b_0 + a_1(-z) + b_1 x + a_2(-2xz) + b_2(x^2 - z^2) + a_3(z^3 - 3xz^2) + b_3(x^3 - 3xz^2) + \dots$$

Напряжение с датчика Холла является функцией магнитного поля, нормального к его поверхности, которое равно

$$H_i = H_z(x_i, z_i) \cos \varphi_i + H_x(x_i, z_i) \sin \varphi_i,$$

где x_i, z_i - координаты i -го датчика от орбиты, φ - угол его наклона в плоскости (x, z) .

В ходе решения подбирались такие коэффициенты a и b разложения поля, чтобы сумма по всем датчикам квадратов отклонений замеренного датчиком поля h_i от расчетного поля H_i была бы минимальной, т.е.

$$\sum_i (h_i - H_i)^2 = \min$$

Решение этого уравнения сводится к системе линейных уравнений по a и b . Обычно использовалось разложение поля до кубичной нелинейности включительно.

Для однозначного выбора коэффициентов в этом случае достаточно иметь всего восемь датчиков Холла. Избыточность количества датчиков позволяет уменьшить случайную ошибку и сделать систему измерений более надежной. При неисправности одного или нескольких датчиков или при неправильной перфорации результатов счет поля проводится автоматически без учета неправильных показаний.

Поскольку зависимость напряжения с датчика Холла от поля не строго линейна, проводилась калибровка датчиков в однородном поле, замеренном методом ядерного резонанса. Измерения проводились при 30 ÷ 40 значениях поля; получающаяся зависимость аппроксимировалась полиномом:

$$h_i = \sum_k c_k V^k.$$

При имевших место точностях измерения напряжения, эквивалентных ошибкам в поле примерно в 2 эрстеда, было достаточно ограничиться шестью членами разложения. Калибровочные коэффициенты c_k также вводились в вычисленную машину для каждого датчика.

Координаты каждого датчика измерялись магнитным способом в неоднородном магнитном поле, а также механически с точностью не хуже 0,05% мм; углы датчиков замерялись по отношению напряжений, снимаемых с датчиков в двух однородных, взаимно-перпендикулярных полях.

Положение блока датчиков относительно орбиты фиксировалось направляющей с точностью 0,03 мм, расстояние вдоль магнита не хуже 0,2 мм.

В каждом измеряемом сечении кроме показаний датчиков заносятся на перфоленду и вводились в вычислительную машину "нуль" усилителя с цифровым вольтметром,

а также эталонное напряжение, по которому рассчитывались истинные напряжения, снимаемые с датчиков.

В машину одновременно вводится и обрабатывается около 150 групп чисел, соответствующих различным сечениям по всей длине трехметрового элемента периодичности при одном значении тока магнита.

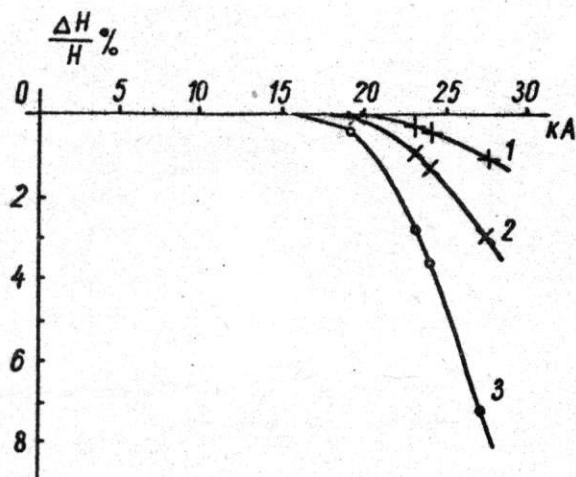


Рис. 1. Насыщение магнитов: 1 - фокусирующий магнит, 2 - дефокусирующий магнит, 3 - заворачивающий магнит

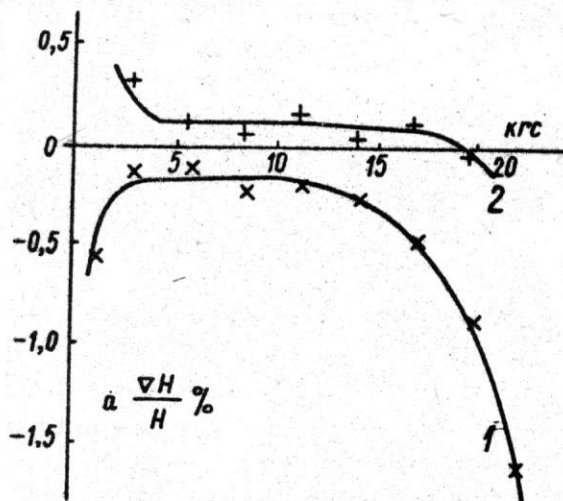


Рис. 2. Отклонение градиента от расчетного значения в зависимости от поля в заворачивающем магните: 1 - дефокусирующий магнит, 2 - фокусирующий магнит

Результатом обработки являются эффективные значения длин, средние значения полей, градиентов и нелинейностей, а также их разброс по каждому из элементов, входящих в магнитный блок; значения частот бетатронных колебаний; имеется возможность выдачи в любом сечении значений коэффициентов разложения поля, значений градиента на различных радиусах, полей, замеренных каждым датчиком.

Система измерений испытывалась на известных полях; имеющийся разброс результатов, характеризующий качество измерительной системы не превышает: по полю $\Delta H/H \leq 5 \cdot 10^{-4}$, градиенту $\Delta(\nabla H)/\nabla H \leq 2 \cdot 10^{-4}$, по квадратичной нелинейности $\Delta H''/H \leq 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ 1/см}^2$, кубичной - $\Delta H'''/H \leq 3 \cdot 10^{-4} \text{ 1/см}^3$.

Предварительные магнитные измерения позволили определить эффективные длины элементов по полю и градиенту и более точно рассчитать геометрические длины элементов магнита для получения требуемых частот бетатронных колебаний.

В диапазоне полей 2-16 килогаусс (цифры относятся к полям в заворачивающем магните) параметры магнитной системы практически не изменяются.

При меньших полях начинают оказывать влияние остаточные поля, достигающие в заворачивающем магните 10 эрстед. Форма остаточного поля и его разброс позволяют работать на накопителе при поле в 1 кгс без размагничивания магнитопровода. При полях больше чем 16 кгс наблюдается два эффекта: первый - разное насыщение магнитопроводов различных участков блока (рис. 1), что приводит к изменению частот бетатронных колебаний (для устранения этого эффекта имеются дополнительные обмотки в фокусирующих и дефокусирующих магнитах на 13% полного тока); второй эффект - насыщение полюсов, прежде всего дефокусирующего магнита (рис. 2,3), требующее коррекции градиента и квадратичной нелинейности. Кубичная нелинейность мала при всех полях.

Однородность поля по длине блока не хуже $5 \cdot 10^{-4}$, при больших полях происходит небольшое уменьшение поля по концам магнитов.

Изменение частот бетатронных колебаний по магнитным измерениям элемента периодичности при подъеме поля без каких-либо коррекций показан на рис. 4.

Можно надеяться, что без больших затруднений будет поднято поле в заворачивающем магните до 20 кгс, или до среднего поля в накопителе в 16 кгс.

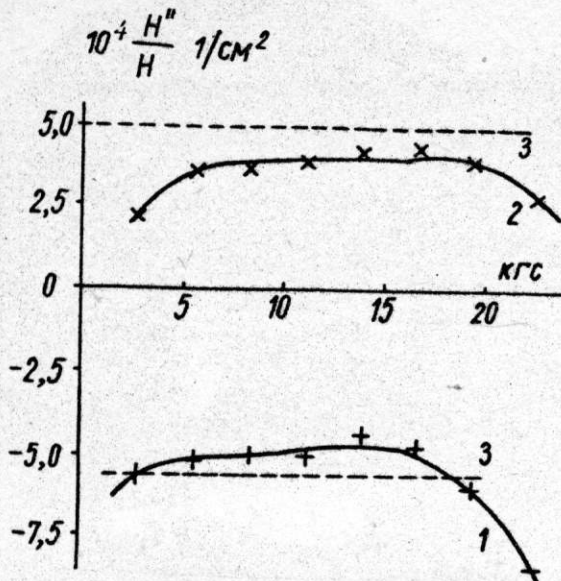


Рис. 3. Квадратичная нелинейность в зависимости от поля в заворачивающем магните: 1 - дефокусирующий магнит, 2 - фокусирующий магнит, 3 - расчетные значения

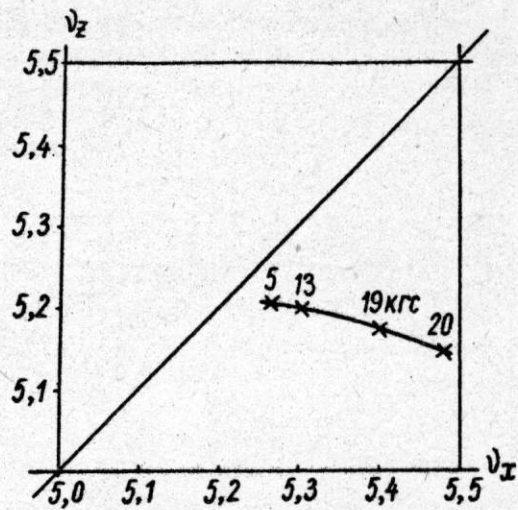


Рис. 4. Изменение частот бетатронных колебаний при подъеме поля

ЛИТЕРАТУРА

1. Баклаков Б.А. и др., настоящий сборник, стр. 674. "Устройство для прецизионных измерений магнитного поля".

110. УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЭЛЕКТРОМАГНИТЕ НАКОПИТЕЛЯ

Б.А. Баклаков, М.М. Карлинер, Б.В. Левичев, А.С. Медведко, И.Я. Протопопов
(Институт ядерной физики СО АН СССР)

Изготовление и наладка электромагнита накопителя встречных электрон-позитронных пучков ВЭПП-3 [1] требует примерно $(1,5-2) \times 10^6$ измерений магнитного поля (в пределах $3 \div 20$ кгс). Погрешность этих измерений не должна превышать $\pm 10^{-3}$.

Необходимость в применении автоматической измерительной системы с последующей обработкой результатов на ЭВМ для решения подобной задачи очевидна.

Ниже описывается разработанная в ИЯФ СО АН СССР измерительная система, использующая в качестве измерительных элементов датчики Холла. Последние удобны тем, что обеспечивают возможность непосредственных измерений с отсчетом по цифровому вольтметру; кроме того, они могут работать в сильно неоднородных магнитных полях. Применение цифрового вольтметра позволяет получать результаты измерений на перфоленте, что облегчает их ввод в ЭВМ для последующей обработки.

В системе использованы датчики Холла, разработанные в Институте полупроводников АН СССР (Ленинград). Их типовые параметры приведены в таблице.

Параметры датчика Холла

Тип материала	Арсенид индия
Рабочая площадь датчика (мм ²)	1 x 1,5
Чувствительность (мкВ/ма.эрст)	0,9 ÷ 0,8
Рабочий ток (ма)	до 50
Входное сопротивление (ом)	20 ÷ 150
Выходное сопротивление (ом)	20 ÷ 150
Температурный коэффициент чувствительности (%/град.С)	-0,03 ÷ 0,05
Неэквипотенциальность при токе 50 ма (не более) (мв)	± 3

Измерения производятся с помощью 15 датчиков, равномерно размещенных по сечению камеры магнита (см. рис. 1).

Датчики измеряют вертикальную (H_z) компоненту магнитного поля. Шестнадцатый датчик измеряет радиальную компоненту поля в центре сечения камеры.

Датчики имеют нелинейную зависимость э.д.с. от величины поля (нелинейность 2-3% при 20 кгс) и требуют градуировки, которая производится в специально сконструированном магните с неоднородностью поля не более $\pm 5 \cdot 10^{-5}$ в области размещения блока датчиков. При этом поле контролируется с помощью ядерного магнитометра.

После сборки блока датчиков в специальных магнитах измерялись координаты и углы наклона датчиков относительно базовых плоскостей. Данные градуировки и измерения координат и углов используются при обработке результатов измерений на ЭВМ [2]. При измерениях блок датчиков может быть перемещен в любое сечение магнита с необходимой точностью с помощью направляющих, закладываемых в магнит на время измерений.

Блок датчиков Холла помещен в термостат, представляющий собой коробку, с внутренней стороны которой бифилярно уложены медная и константиновая обмотки, служащие нагревательными элементами. Обе обмотки включены в схему моста в цепи положительной обратной связи автогенератора, в состав которого входит также избирательный усилитель мощности (см. схему рис. 2).

В установившемся режиме мост близок к балансу, который имеет место при определенном сопротивлении медной обмотки (и, следовательно, при определенной ее температуре). При изменении окружающей температуры изменяется мощность на выходе усилителя таким образом, что температура остается постоянной. В рабочем диапазоне окружающей температуры от $+10^{\circ}\text{C}$ до $+30^{\circ}\text{C}$ температура датчиков изменяется менее, чем на 1°C . Частота нагревающего тока около 800 гц, максимальная мощность на выходе усилителя – 8 вт.

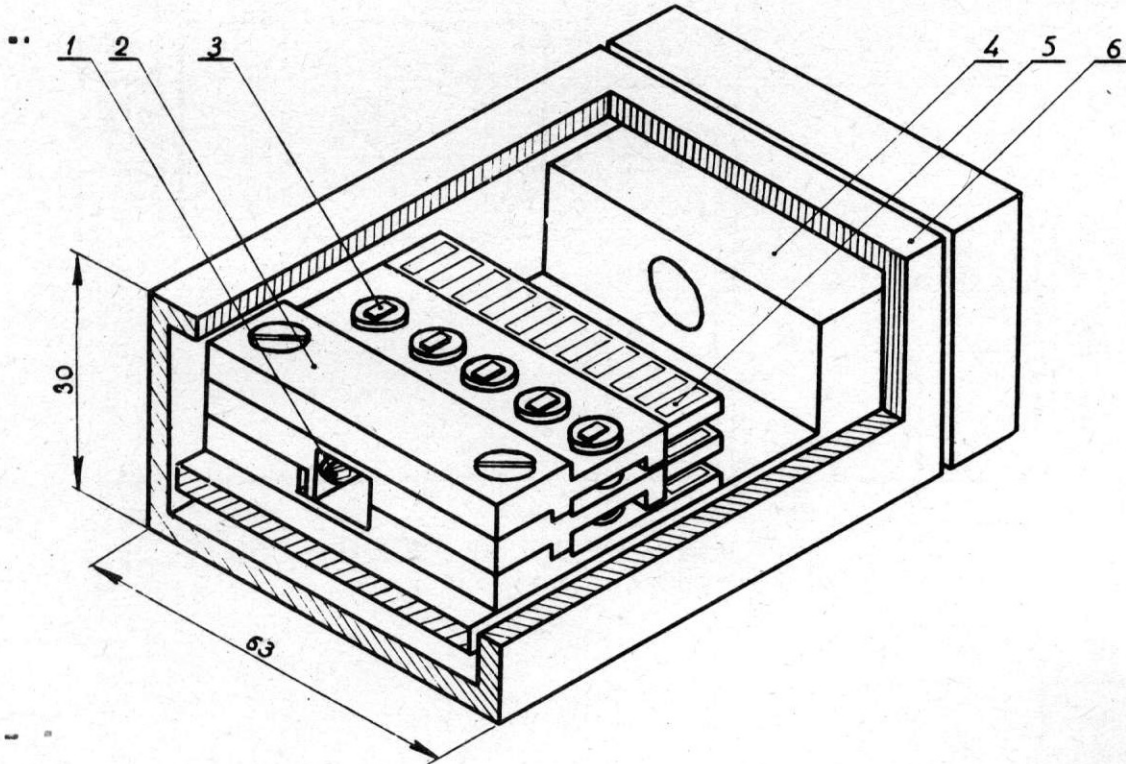


Рис. 1. Общий вид блока датчиков Холла: 1 – датчик, измеряющий радиальную компоненту магнитного поля; 3 – датчик, измеряющий вертикальную компоненту магнитного поля; 4 – элемент несущей конструкции; 5 – лепестки для распайки датчиков; 6 – коробка термостата

Блок-схема измерительного устройства приведена на рис. 3.

Все датчики (1) по цепи питания соединены последовательно и питаются от одного источника (3), обеспечивающего стабильность тока порядка $\pm(2;3) \cdot 10^{-4}$ в течение длительного времени.

Выходы датчиков с помощью коммутатора (4) поочередно присоединяются к прецизионному усилителю постоянного тока (6). Входная схема с контактами коммутирующих реле и потенциометрами для компенсации э.д.с. неэквипотенциальности электродов датчиков показана на рис. 4.

Включение n -ого датчика осуществляется при замыкании двух контактов реле N_n . Для коммутации применены реле типа РМУГ, контакты которых обеспечивают величину термоэдс менее 5 мкв при температуре до $+40^{\circ}\text{C}$.

Компенсация эдс неэквипотенциальности осуществляется потенциометрами R_n для каждого датчика отдельно.

Усилитель постоянного тока выполнен по схеме с преобразованием постоянного тока в переменный с помощью электромеханического прерывателя. Дрейф усилителя, отнесенный к входу, не превышает ± 5 мкв за 10 часов. Усилитель охвачен глубокой отрицательной связью. Коэффициент усиления изменяется с помощью переключателя

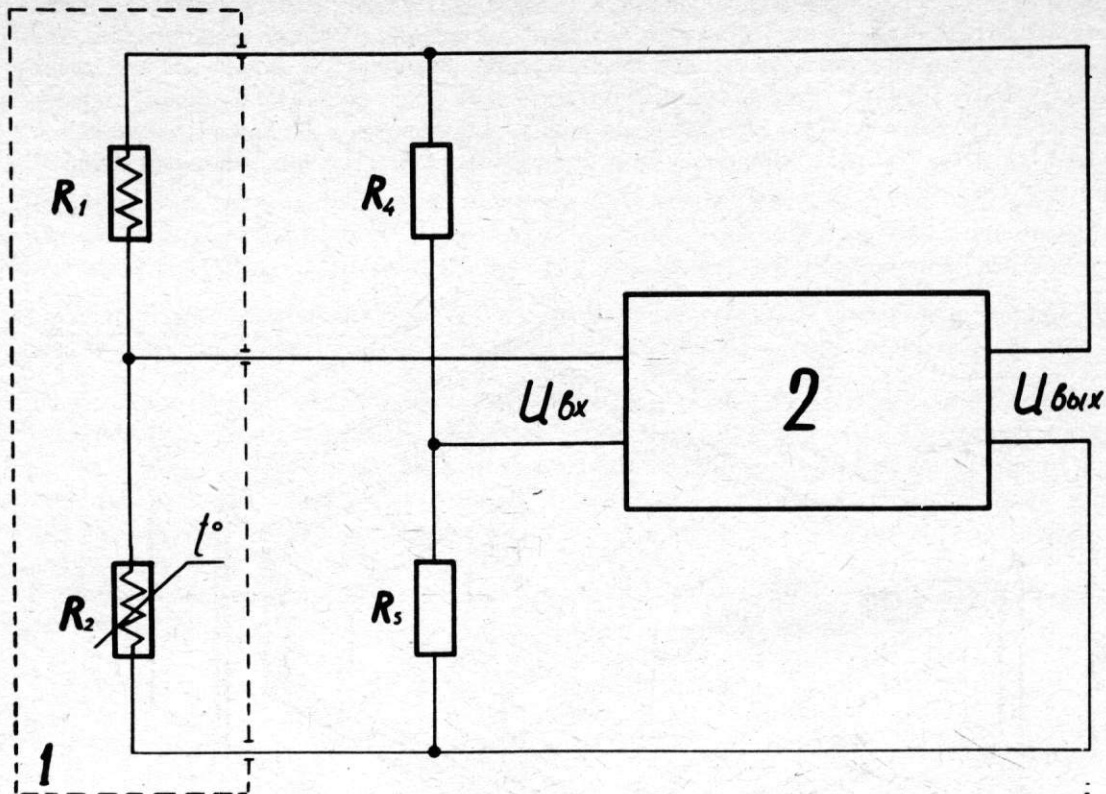


Рис. 2. Блок-схема термостата; 1 - рабочий объем термостата; 2 - избирательный усилитель

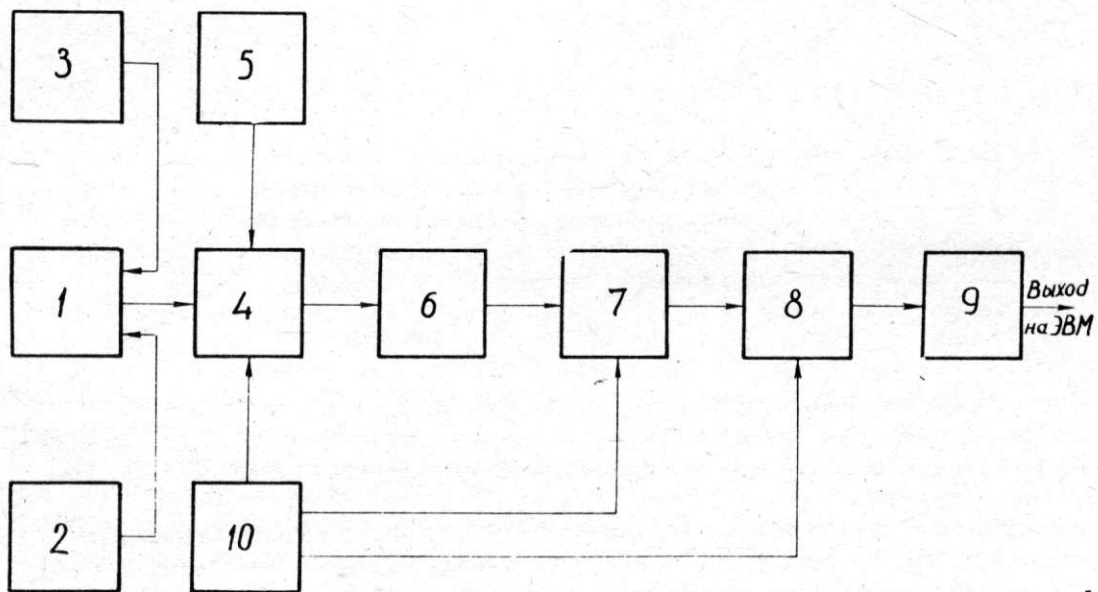


Рис. 3. Блок-схема измерительного устройства: 1 - блок датчиков Холла; 2 - термостат; 3 - источник тока; 4 - коммутатор; 5 - схема компенсации ЭДС неэквивалентности датчиков; 6 - усилитель постоянного тока; 7 - цифровой вольтметр; 8 - преобразователь кода; 9 - перфоратор; 10 - блок управления

и может принимать значения 10; 16; 25; 40; 60; 100; 160, что позволяет полностью использовать точность цифрового вольтметра. Нестабильность коэффициента усиления не превышает $(2 \div 5) \cdot 10^{-4}$, нелинейность амплитудной характеристики составляет 10^{-4} при выходном напряжении до 12 в и токе до 5 ма. Время установления напряжения на выходе с точностью 10^{-3} от установившегося значения не превышает 0,2 сек.

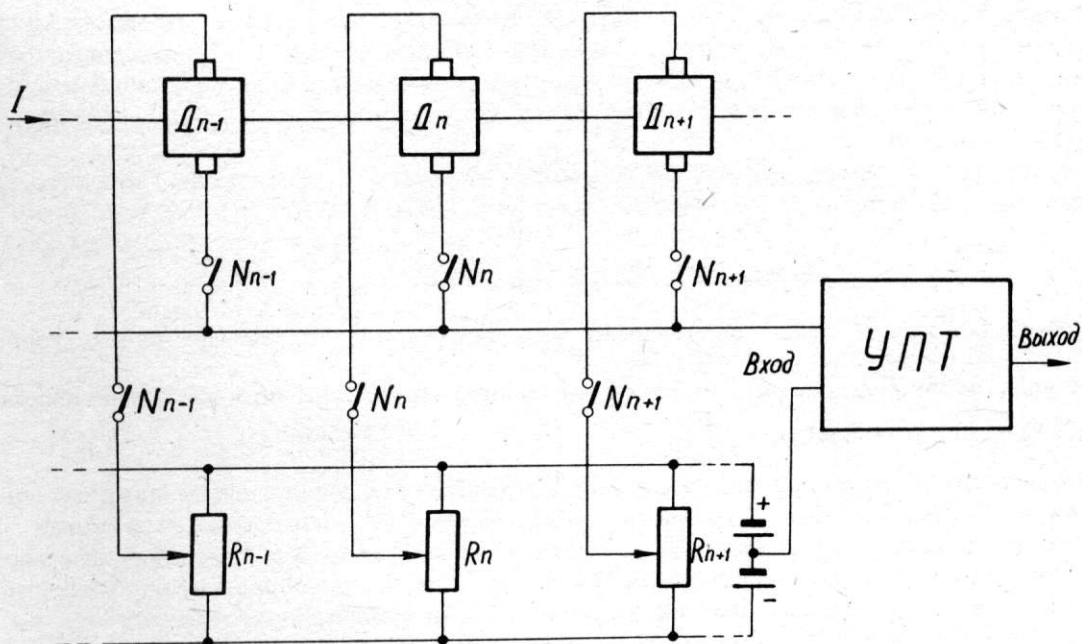


Рис. 4. Схема коммутации датчиков

Для измерения напряжения на выходе усилителя постоянного тока используется цифровой вольтметр (7) типа Ш1511. Результат измерения, получаемый в виде параллельного кода, подается через преобразователь кода на перфоратор (9); после завершения цикла измерений результаты могут быть с помощью перфоленты введены в используемую для обработки ЭВМ типа "Минск-22".

Автоматический цикл измерений при некотором положении блока датчиков включает последовательный опрос всех датчиков, запись нуля усилителя при закороченном входе, проверку коэффициента усиления усилителя и тока датчиков. Последняя заключается в том, что ко входу усилителя присоединяется эталлонное сопротивление, включенное в цепь питания датчиков. Величина падения напряжения наносится на перфоленту и при обработке на ЭВМ позволяет исключить из результата измерения поля ток датчика и коэффициент усиления усилителя [2]. Благодаря этому требования к стабильности тока датчиков и коэффициента усиления снижаются.

При окончании цикла блок датчиков автоматически перемещается в следующее сечение.

Порядок опроса датчиков и длительность рабочего цикла задаются блоком управления (10), который дает команду переключения на коммутатор, сигнал запуска на цифровой вольтметр и сигнал на преобразователь кода для перфорации.

Описанная измерительная система обеспечивает точность измерения в каждой точке лучше 10^{-3} . Погрешность определяется, в основном, нестабильностью параметров датчиков Холла.

Благодаря избыточности информации, получаемой от 15 датчиков в каждом сечении, после обработки на ЭВМ общая точность значительно повышается [2]. Кроме того, повышается надежность работы системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г.И. Будкер и др. настоящий сборник, стр. 270. Магнитная система накопителя ВЭПП-3.
2. Б.В. Левичев и др. настоящий сборник, стр. 648. Магнитные измерения на накопителе ВЭПП-3.

111. УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ *) В СИНХРОТРОНЕ

Захваткин М.Н., Нифонтов В.И., Шалашова Л.Н., Песляк Б.М. (Институт ядерной физики СО АН СССР)

Устройство предназначено для измерения параметров импульсных магнитных полей в заданный момент времени, данные выдаются в цифровой форме. Проведя серию измерений на различных участках в различные моменты времени, можно исследовать поведение поля и градиента поля в данной точке камеры ускорителя на протяжении всего цикла ускорения.

Устройство выполнено на полупроводниковых приборах и нувисторах. Точность измерения поля 10^{-3} , точность измерения градиента поля $5 \cdot 10^{-3}$.

Блок-схема тракта устройства

Блок-схема тракта и импульсно-временные диаграммы, поясняющие работу устройства, даны на рис. 1,

Сигнал, характеризующий магнитное поле синхротрона, снимается с индуктивного датчика в виде производной $\frac{dH}{dt}$.

Синхроимпульс подается для подготовки устройства к работе перед началом цикла ускорения. С помощью блока задержки выбирается момент измерения напряжения, поступающего с интегратора. Импульс с блока задержки является "сбросом" для пересчетного устройства. В момент сравнения напряжения на преобразователе "напряжение-время" с запомненным напряжением и нулем с преобразователя выдаются импульсы "пуск" и "стоп" на пересчетное устройство.

С пересчетного устройства получаем цифровое значение интервала времени, пропорционального измеряемому напряжению, которое в свою очередь пропорционально напряженности магнитного поля в момент измерения.

Запоминающее устройство

Устройство решает задачу запоминания мгновенного значения уровня напряжения в определенный момент времени.

В качестве запоминающего устройства используется известная схема зарядного устройства с обратной связью [1] и [2].

Принципиальная схема устройства представлена на рис. 2.

В качестве компаратора используется дифференциальный усилитель на триодах T_3, T_4 . Триод T_2 , являющийся источником тока, открывается импульсом, поступающим с формирователя. Формирователь собран по схеме одновибратора на туннельном диоде D_1 , с последующим усилением триодом T_1 . Импульс на срабатывание формирователя поступает с блока задержки. При работе запоминающего устройства в режиме постоянного слежения, туннельный диод D_1 переключается тумблером P_2 в триггерный режим, приводится в непроводящее состояние с поступлением импульса с блока задержки. Триоды T_6, T_7 и диоды D_9, D_{12} образуют цепь заряда накопительного конденсатора C_2 . Диоды D_{13}, D_{14} с резисторами R_{18}, R_{19} создают запирающий потенциал, постоянный /средняя точка диодов D_{13}, D_{14} всегда имеет потенциал, равный потенциалу накопительного конденсатора (рис.3) / относительно запомненного напряжения, что позволяет снизить выброс в момент переключения, а также уменьшить разностную составляющую обратного тока $D_9 - D_{12}$ при разных уровнях измеряемого напряжения. Триод T_5 является фазовым инвертором для того, чтобы на базу триода T_7 подавалось соответствующее напряжение. Когда открывается триод T_2 , замыкается цепь обратной связи, и дифференциальный усилитель обрабатывает рассогласование сигналов, приложенных к его входам, управляя величиной и направлением тока заряда накопительного конденсатора. Чтобы избежать появления выбросов и затягивания колебательных переходных процессов при обработке ступенчатых сигналов, введены корректирующие емкости C_1, C_3 .

В качестве буферного каскада используется сложный эмиттерный повторитель на нувисторе Λ_1 и транзисторах T_{10}, T_{11}, T_{12} . Режим работы нувистора стабилизируется с помощью генератора тока (T_9), стабилвольтов D_{16}, D_{17} резистора R_{26} . В результате сохраняется малое значение сеточного тока во всем диапазоне измеряемого напряжения. Напряжение сетка - катод остается постоянным, что необходимо для сохранения нулевой разности напряжения между накопительной емкостью и средней точкой диодов D_{13}, D_{14} при переключении в режим хранения.

Выходной каскад - составной эмиттерный повторитель - обеспечивает передачу сигнала обеих полярностей и малое выходное сопротивление.

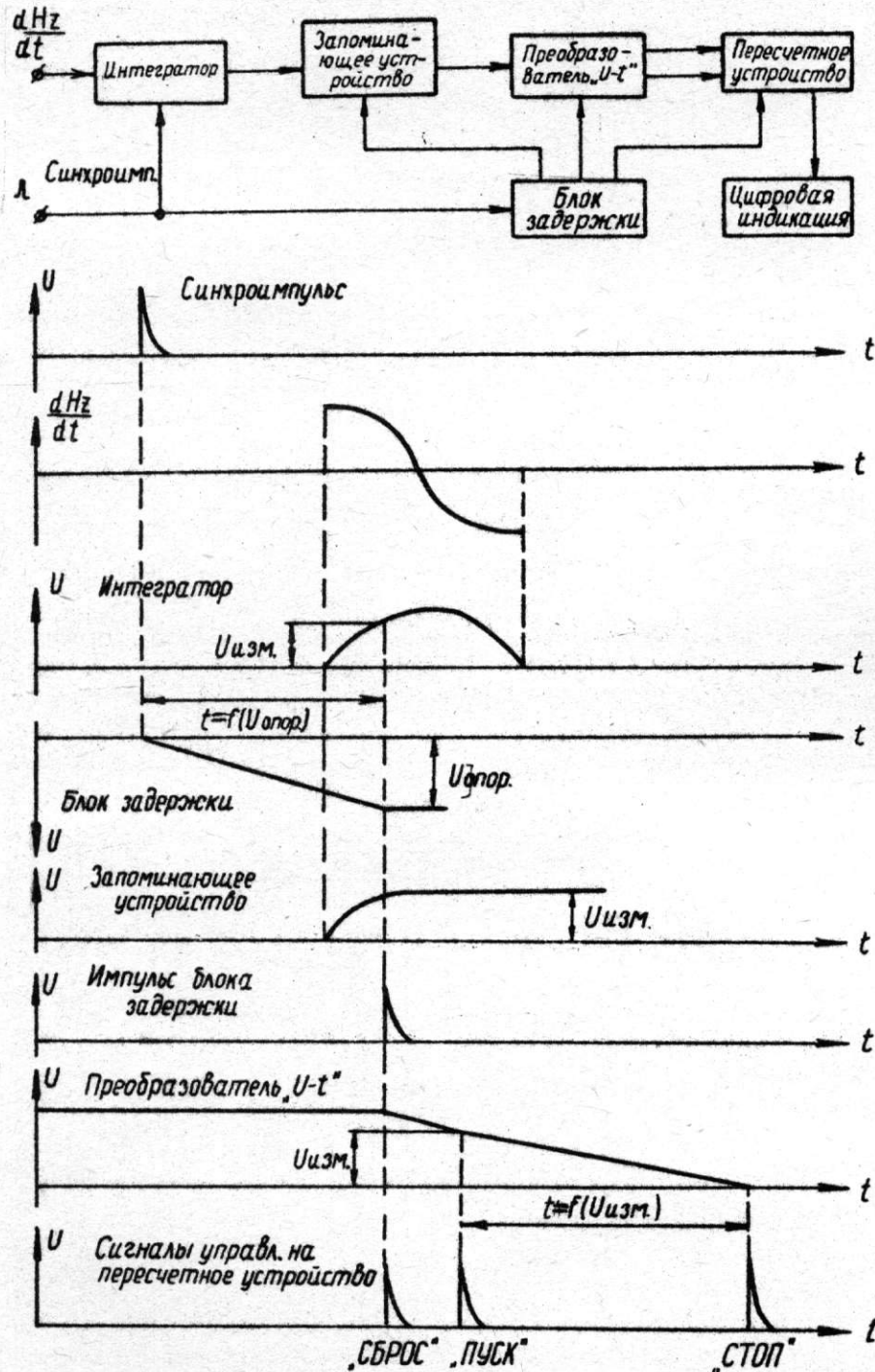


Рис. 1. Блок-схема и импульсно-временные диаграммы, поясняющие работу устройства

Основная статическая погрешность запоминающего устройства складывается из следующих составляющих:

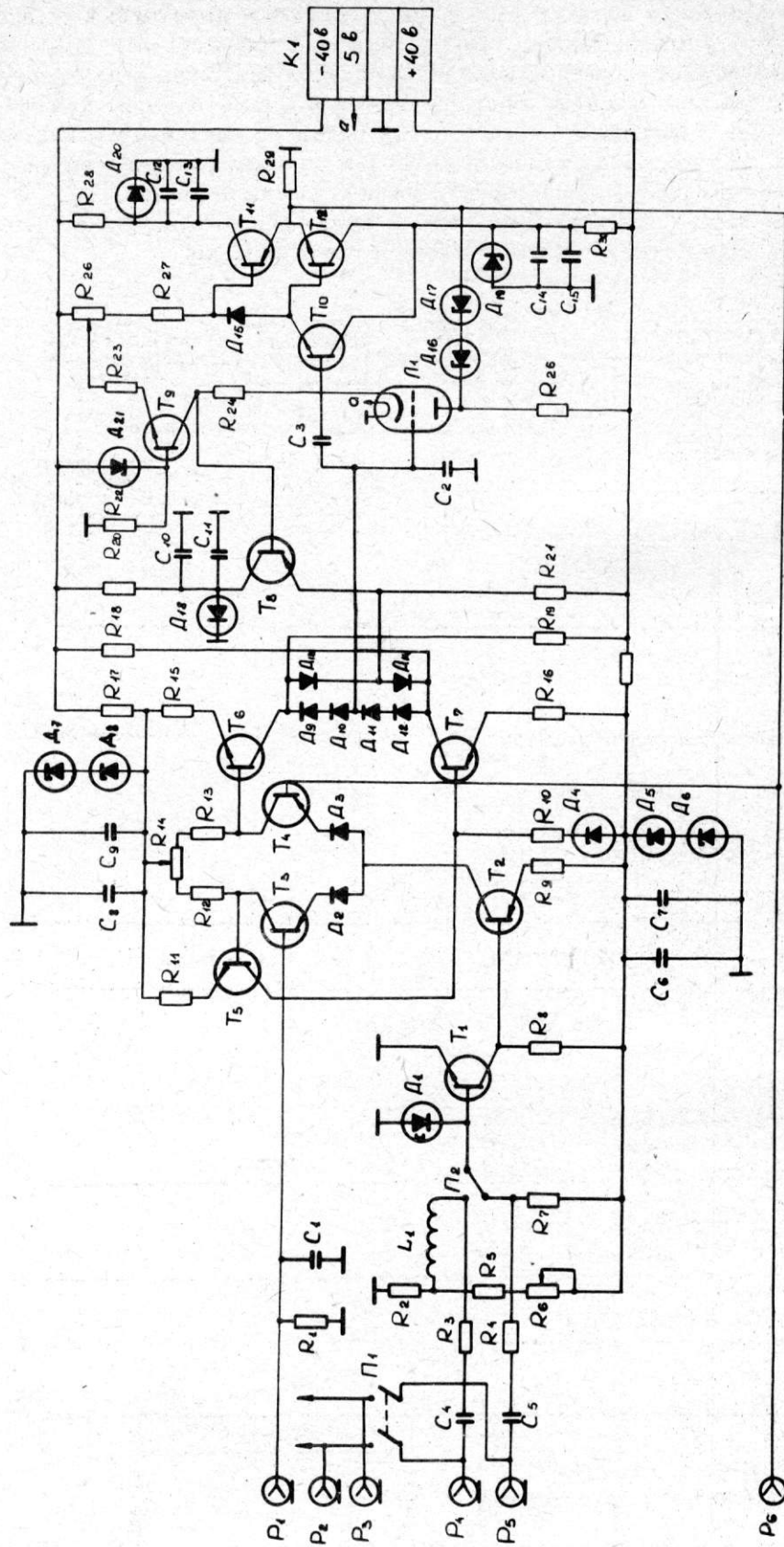


Рис. 2. Принципиальная схема запоминающего устройства

- 1) Погрешность дифференциального усилителя.
- 2) Погрешность за счет разряда накопительного конденсатора за время хранения.
- 3) Погрешность, обусловленная конечным временем восстановления обратного сопротивления и наличием проходной емкости изолирующих диодов $D_9 \div D_{12}$.
- 4) Дополнительная температурная погрешность за счет дрейфа нуля дифференциального усилителя и появления температурной составляющей тока разряда конденсатора C_2 .

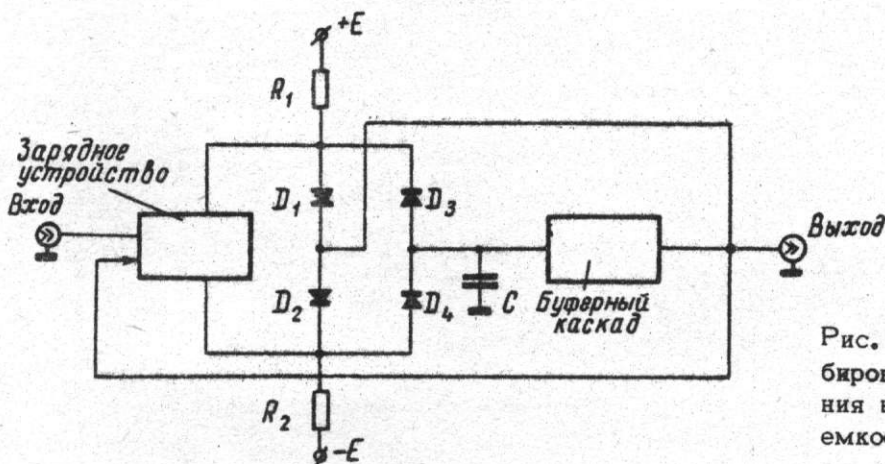


Рис. 3. Схема стабилизации напряжения на запоминающей емкости

Расчет составляющих погрешностей приведен в [3].

Расчетное значение статической погрешности запоминающего устройства $0,05\% U_{вх} \pm \pm 3$ мВ.

Динамическая погрешность (погрешность недозаряда) возникает за счет изменения измеряемой величины во времени. Запоминатель можно рассматривать как зарядную RC цепь с постоянной времени $\tau_{эвк} = \frac{R_{зар} C_2}{K_p}$, где $R_{зар} = R_{15} = R_{14} = = R_{11}$, K_p — разностный коэффициент усиления дифференциального усилителя.

Переходная характеристика такой цепи: $K(t) = 1 - e^{-at}$; $a = \frac{1}{\tau_{эвк}}$. Пользуясь интегралом Дюамеля $U_2(t) = U_1(\omega) K(t) + \int_0^t U_1(r) K(t-r) dr$, можно получить относительную динамическую ошибку $\delta_d(t)$

$$\frac{U_1(t) - U_2(t)}{U_1(t)} = \delta_d(t)$$

при $U_1(t) = U_m \sin \omega t$

$$\begin{aligned} U_2(t) &= \int_0^t \omega U_m \cos \omega r \left[1 - e^{-a(t-r)} \right] dr = \\ &= U_m \sin \omega t - U_m \frac{\omega a}{\omega^2 + a^2} \cos \omega t + U_m \frac{\omega^2}{\omega^2 + a^2} \sin \omega t + \\ &+ U_m \frac{\omega a}{\omega^2 + a^2} e^{-at}. \end{aligned}$$

Относительная ошибка

$$\delta_d(t) = \frac{\omega a}{\omega^2 + a^2} \operatorname{ctg} \omega t + \frac{\omega^2}{\omega^2 + a^2} - \frac{\omega a}{\omega^2 + a^2} \frac{e^{-at}}{\sin \omega t}.$$

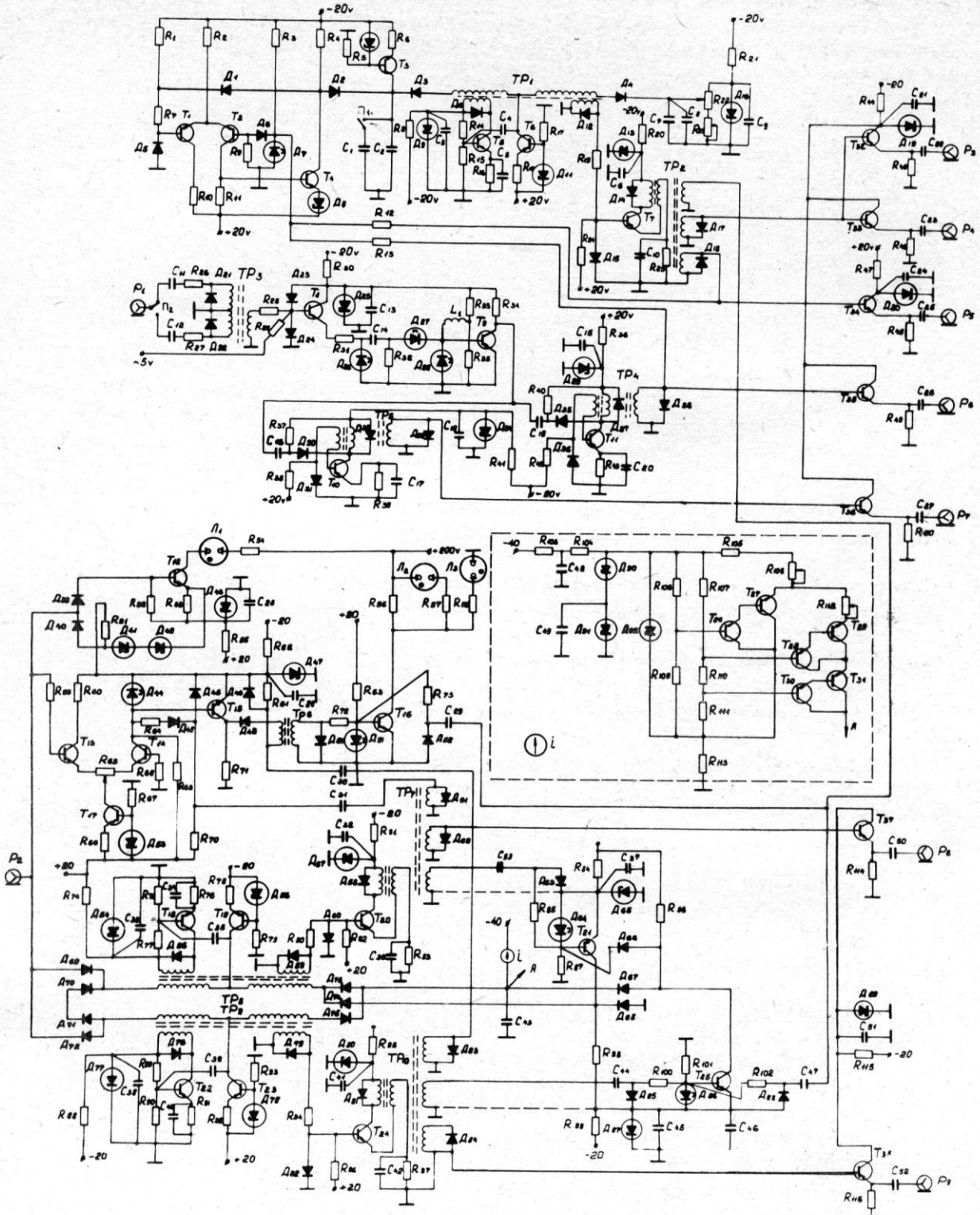


Рис. 4. Принципиальная схема блока преобразования "напряжение - время" и блока задержки

Расчеты показывают, что для данной схемы при $\omega = 2000 \delta_D(t) < 10^{-4}$.

Блок преобразования "напряжение - время"

Принципиальная схема преобразователя представлена на рис. 4. Измеряемое напряжение с запоминающего устройства поступает на вход двух диодно-регенеративных компараторов. Емкость C_{43} перед началом измерения заряжена до потенциала +12в. Импульс с блока задержки - команда "начать измерение" перебрасывает ключ на туннельном диоде D_{86} и транзисторе T_{25} в проводящее состояние. Диод D_{67} закрывается потенциалом -12в. Начинается разряд конденсатора C_{43} током генератора

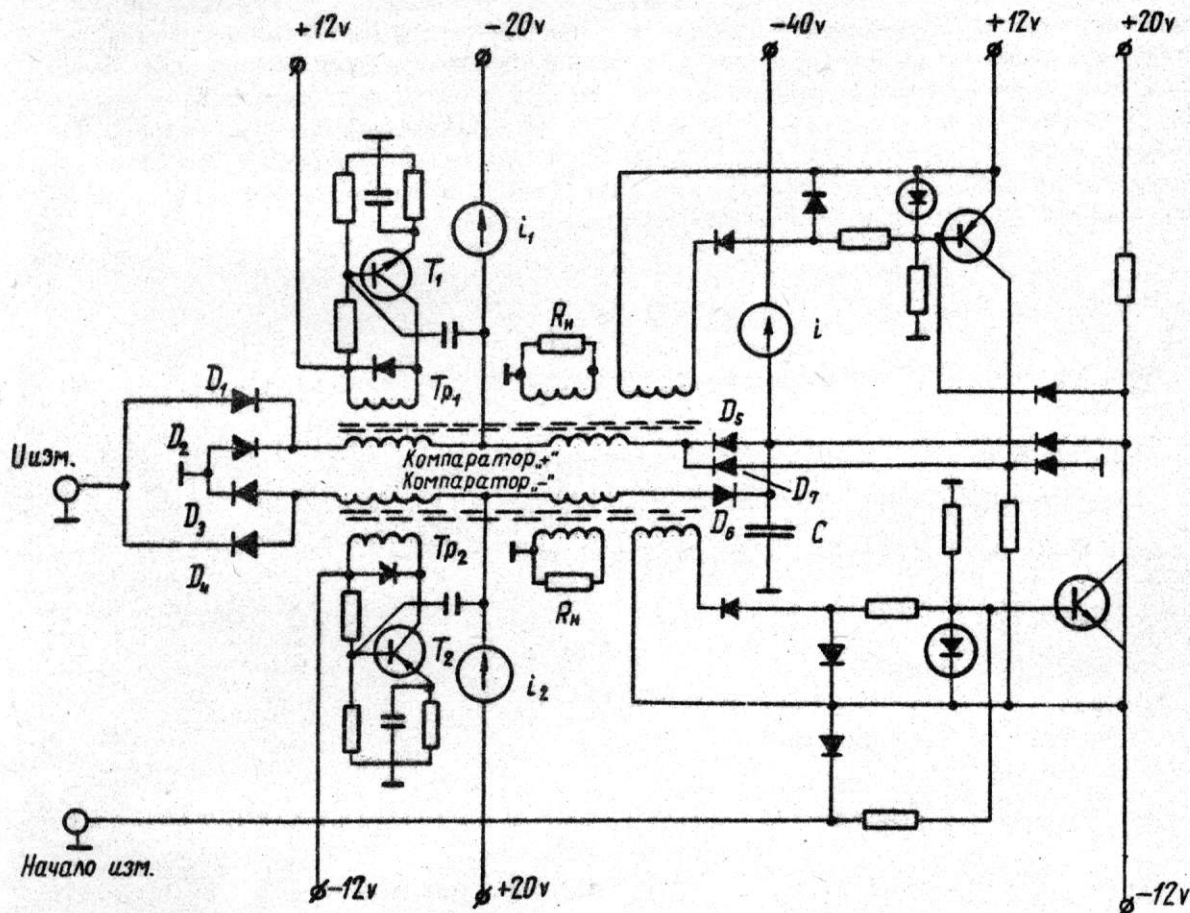


Рис. 5. Узел преобразования напряжения во время

тока i и током генератора тока на триоде T_{19} в компараторе "+" через диод D_{73} . Как только напряжение на емкости C_{43} достигнет измеряемого напряжения (или нуля при измерении отрицательного напряжения), открывается диод D_{69} (или D_{70}). Диод D_{73} закрывается. Замыкается цепь положительной обратной связи, срабатывает блокинг-генератор на триоде T_{18} . Первый импульс с нагрузочного блокинг-генератора на триоде T_{20} поступает на нормально закрытый ключ на туннельном диоде D_{64} и транзисторе T_{21} . Транзистор T_{21} открывается, и положительный потенциал через диод D_{74} закрывает диод D_{69} (или D_{70}), разрывая цепь положительной обратной связи "+" компаратора. Импульс "+" компаратора поступает на пересчетное устройство в качестве команды "пуск".

Таким образом, с момента сравнения напряжения на емкости с измеряемым напряжением (или с нулем при измерении отрицательного напряжения), емкость оказывается изолированной от всех цепей, за исключением генератора постоянного тока i , который продолжает линейный разряд емкости до нуля (или до отрицательного напряжения).

В момент сравнения напряжения на емкости с нулем (или $U - \text{изм.}$) открывается диод D_{75} , включается положительная обратная связь в "-" компараторе. Импульс "-" компаратора закрывает ключ на триоде T_{25} и триоде T_{21} . Емкость заряжается до +12в, схема возвращается в исходное состояние. Описанная часть схемы блока преобразования показана на рис. 5.

Схема содержит также узлы: ограничитель, схему определения знака измеряемого напряжения и стабильный генератор тока.

Блок задержки

Блок задержки создает плавно регулируемый временной интервал между синхроимпульсом и моментом измерения исследуемого напряжения. Принципиальная схема блока задержки изображена на рис. 4.

В исходном состоянии напряжение на зарядной емкости C_2 равно нулю, устанавливается с помощью схемы установки нуля. Импульс запуска блока задержки отключает схему установки нуля. Ток генератора тока на триоде T_3 начинает разряд емкости от нуля до $-U$ опорное. Опорное напряжение устанавливается с помощью масштабного сопротивления R_{22} , которое отградуировано в единицах времени задержки. В момент сравнения напряжения на емкости с опорным напряжением происходит срабатывание компаратора. Импульс с блокинг-генератора на транзисторе T_7 включает схему установки нуля, что приводит узел задержки в исходное состояние, подается на запоминающее устройство, на схему преобразователя "напряжение-время", на пересчетное устройство в качестве команды "сброс".

ЛИТЕРАТУРА

1. Л.А. Маталин и др. "Многоканальные анализаторы ядерной физики. Атомиздат, 1967 г.
2. P.E. Harris and B.E. Simmons IEEE Transactions on ELECTRONIC COMPUTERS, 1964, Volume EC-13, № 3, p. 285.
3. В.Н. Вьюхин, Автометрия, 1968, № 6, стр. 60.



Подписано в печать 4/IX -1969 г. Тираж 800 экз. Заказ 5158

Производственно-издательский комбинат ВИНТИ
Люберцы, Октябрьский проспект, 403