

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРОБЛЕМАМ УСКОРЕНИЯ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

B381.1

B.85

ТРУДЫ
ВТОРОГО ВСЕСОЮЗНОГО
СОВЕЩАНИЯ
ПО УСКОРИТЕЛЯМ
ЗАРЯЖЕННЫХ
ЧАСТИЦ

(Москва, 11—18 ноября 1970 г.)

Том I



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
Москва 1972

Р

5. ЭЛЕКТРОННЫЙ ПУЧОК ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ЭЛЕКТРОННОМУ ОХЛАЖДЕНИЮ

Г.И. Будкер, В.И. Куделайнен, И.Н. Мешков, В.Г. Пономаренко,
С.Г. Попов, Р.А. Салимов, А.Н. Скринский, Б.М. Смирнов

(Институт ядерной физики СО АН СССР)

Для осуществления демпфирования колебаний частиц в протонных (антипротонных) накопителях Г.И. Будкером был предложен метод "электронного охлаждения" [1], суть которого состоит в следующем. Если в одном из прямолинейных промежутков рейстрекла накопителя создан стационарный пучок электронов, средняя скорость в котором совпадает со средней скоростью βc протонов, колебания последних затухают с характерным временем:

$$\tau \approx 10^7 \frac{\beta^4 \gamma^5}{j \eta} \theta^3 \text{ сек}, \quad (1)$$

где j - плотность тока в пучке электронов в а.см^{-2} ,
 η - отношение длины промежутка "охлаждения" к периметру накопителя,

$$\theta \sim \sqrt{\theta_e^2 + \theta_p^2}, \quad \theta_{p,e} = \frac{(v_{\perp})_{p,e}}{v_{\parallel}}$$

индексы p и e относятся к протонам и электронам соответственно. Наличие остаточного газа в камере накопителя накладывает дополнительные требования на параметры электронного пучка [1, 2]:

$$j/\theta_e \geq \frac{10^7 \beta \gamma^3}{\eta} P, \quad (2)$$

где P - давление остаточного газа, тор.
Установившийся размер прогонного пучка

$$\theta_p \approx 10^3 \sqrt{\frac{\beta \gamma^3 \theta_e^3}{j \eta}} P, \quad (3)$$

причем

$$\theta_p \approx \sqrt{\frac{m_0}{M_0}} \theta_e.$$

Изучение метода предполагается провести на накопительном кольце ВЭПП-3 ИЯФ СО АН СССР [3] при энергии протонов 200 Мэв и электронов 100 кэв. Стационарный пучок электронов вводится в промежуток "охлаждения" и выводится из него с помощью электронно-оптической системы (рис. 1), о которой сказано ниже. Основные параметры электронного пучка ($W=100$ кэв, $J \sim 1$ а ($j \sim 1,3 \text{ а/мм}^2$), $\theta_e \sim 3 \cdot 10^{-3}$, $P \sim 10^{-7}$ тор) позволяют получить $\tau \sim 10$ сек. Ускоренные протоны имеют $\theta_p \sim 3 \cdot 10^{-3}$. Длина промежутка охлаждения 1 м, периметр накопителя 72 м. Общий вид установки электронного охлаждения показан на рис. 2.

Основным требованием, предъявляемым к электронному пучку, является малость поперечных скоростей частиц (2). Оказывается, что практически единственным способом компенсации дефокусирующего действия пространственного заряда пучка является транспортировка его в продольном магнитном поле [4]. Если источник электро-

нов (пушка) помещен в то же магнитное поле, поперечные скорости, вызванные действием пространственного заряда пучка, дают

$$\theta_e \approx \frac{4J}{\beta^2 \gamma^2 c n a}.$$

Здесь a , J - радиус сечения и ток пучка. (Применение каналов со знакопеременной фокусировкой не позволяет получить [4] $\theta_e \approx \sqrt{8eJ/\beta^3 \gamma^3 m c^3}$, что составляет для приведенных выше параметров $4 \cdot 10^{-2}$).

Для оптической схемы с источником, помещенным в магнитное поле, естественным является использование оптики Пирса. Наличие продольного магнитного поля позволяет исключить дефокусирующее действие анодного отверстия. Если длина области Δz на которой действует дефокусирующее радиальное электрическое поле анодов, достаточно близка к величине $\lambda - 2\pi r c/eH$ то возмущение мало:

$$\theta_e \sim \frac{a}{d} \frac{W}{\Delta z \beta e H} \sin \pi \frac{\Delta z}{\lambda}, \quad (5)$$

где d - расстояние между пушкой и первым анодом.

Использовалась треханодная пушка; расстояние между анодами и распределение потенциалов U_i на них были подобраны на электролитической ванне: $\Delta z = 7$ см, $U_1 = 45$ кв, $U_2 = 15$ кв, $U_3 = 0$.

Ввод и вывод пучка из промежутка охлаждения производятся в тороидальном магнитном поле. Для того, чтобы "центробежная" сила не возмущала пучок, на участках ввода и вывода наложено поворотное магнитное поле порядка 20 э.

Неоднородность продольного магнитного поля приводит к возмущению пучка. Если область неоднородности $\Delta z \ll \lambda$, то

$$Q_e \sim 2\pi^2 \frac{a \Delta z}{\lambda^2} \frac{\Delta H}{H}. \quad (6)$$

Если же $\Delta z \geq \lambda$, а зависимость $\Delta H(x)$ достаточно плавная, то

$$\theta_e \sim \pi \frac{a \lambda}{(\Delta z)^2} \frac{\Delta H}{H}. \quad (7)$$

Обмотки продольного магнитного поля выполнены охлаждаемой медной шиной сечением 28×14 мм. Участки ввода и вывода (поворота) пучка представляют собой отрезки тора с сечением, большим сечения прямых участков соленоида. Необходимая однородность поля ($\Delta H/H \leq 5 \cdot 10^{-2}$, $\Delta z \geq 20$ см, $\Delta \theta_e \sim 10^{-3}$) достигается системой экранов, развязывающих магнитные потоки соленоидов с разными сечениями.

Настройка магнитной системы и юстировка оптики пушки контролировались тонким электронным пучком, наблюдаемым с помощью зрительной трубы на люми-

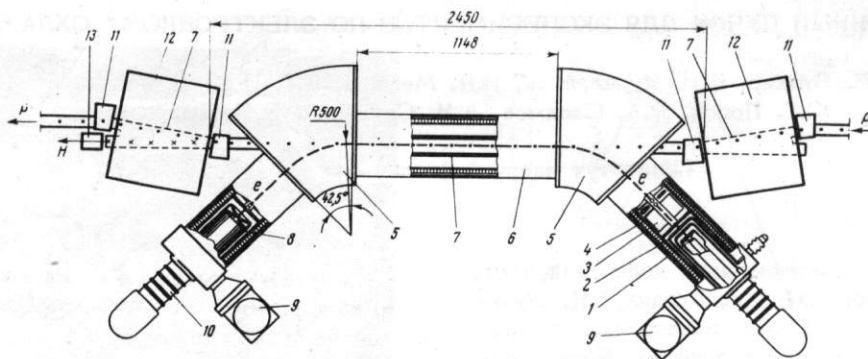


Рис. 1. Схема установки электронного охлаждения

1 - электронная пушка; 2 - анодный блок; 3 - вакуумная камера с распределенным магниторазрядным насосом; 4 - обмотка соленоида; 5 - участок поворота; 6 - промежуток "охлаждения"; 7 - вакуумная камера; 8 - коллектор; 9 - магниторазрядные насосы; 10 - несущий изолятор; 11 - магниты коррекции траектории протонов; 12 - квадрупольные линзы накопителя ВЭПП-3; 13 - счетчик атомов водорода (нейтралов с энергией 200 Мэв)

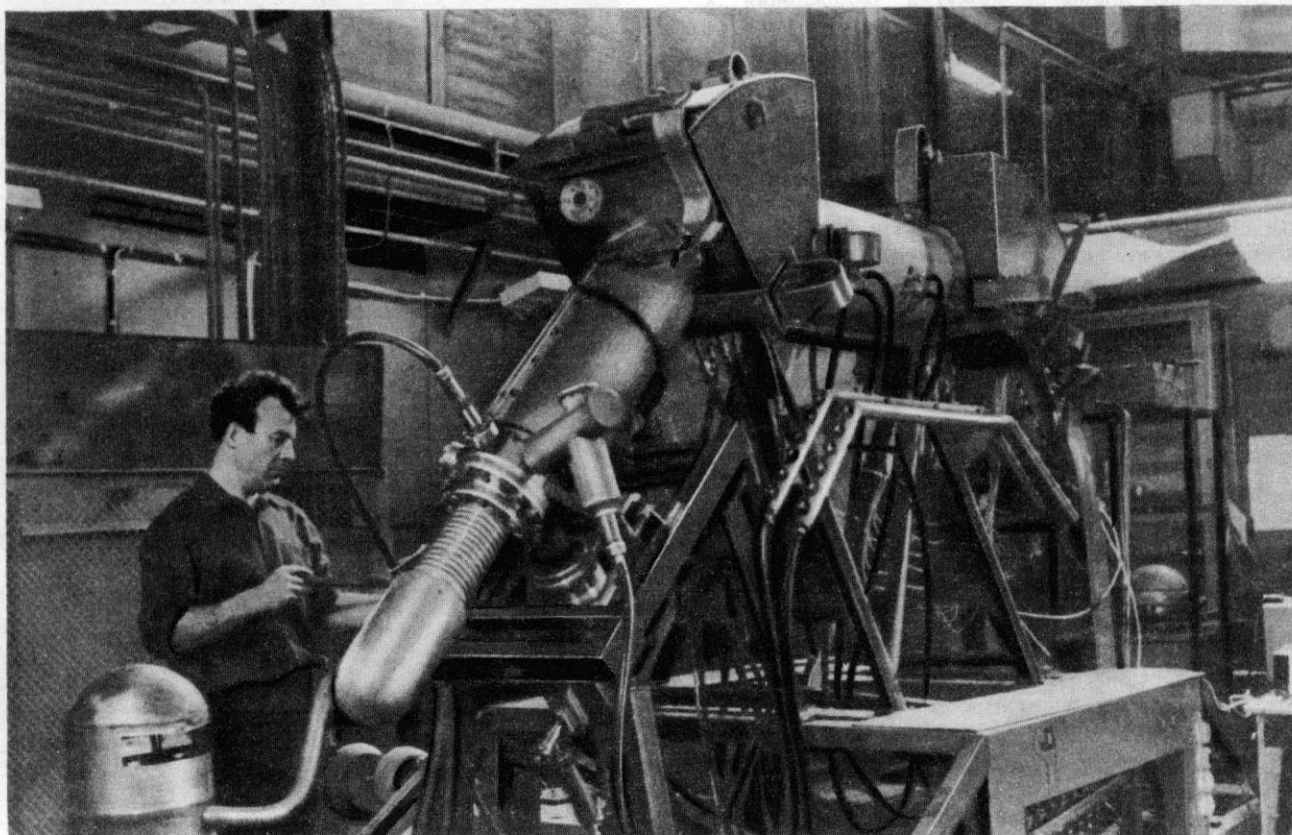


Рис. 2. Общий вид установки электронного охлаждения

несцентном экране. Перемещая экран вдоль осевой траектории и регистрируя смещение изображения Δ , можно оценить возмущение, приобретаемое пучком на соответствующем участке

$$\Delta\theta_e \sim eH\Delta / mc \quad (8)$$

Поскольку разрешение такого метода не лучше 0,5 мм, настройку приходится вести при значениях тока около $H \approx 100$ э (точность измерения $\Delta\theta_e \sim 3 \cdot 10^{-3}$); рабочее значение $H - 1500$ э.

Эксперименты с точечным пучком показали, что магнитная система выполнена удовлетворительно.

Наконец, необходимо хорошее совпадение средних скоростей электронов и протонов [2]. Одним из возможных источников этой ошибки является нестабильность во времени энергии электронов. Поэтому необходимо обеспечить

$$\frac{\Delta W}{W} \leq \frac{\beta^2 \gamma^2}{\gamma - 1} \theta_e \quad (9)$$

При выбранных параметрах установки реактивная мощность пучка составляет 100 квт. Наиболее приемлемым решением возникающей проблемы питания представляется применение известного метода рекуперации энергии "отработанных" электронов.

Эксперименты по рекуперации проводились на установке, не имеющей участков поворота [5]. Длина промежутка "охлаждения" составляла 2 м. В режиме рекуперации был получен постоянный ток $I = 1,1$ а при напряжении $U_0 = 100$ кв (поле соленоида 200 э). Ток потерь не превышал 0,3 ма при вакууме $5 \cdot 10^{-8}$ тор, разности потенциалов между катодом и коллектором 1,3 кв. Таким образом, потребляемая доля мощности составляла 1,3%.

Литература

1. Г.И. Будкер. "Атомная энергия", 1967, 22, № 5, 346.
2. Я.С. Дербенев, А.Н. Скринский. Препринт № 255, ИЯФ СО АН СССР.

3. Г.И. Будкер, И.Я. Протопопов, А.Н. Скринский. Труды УИ Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий, том. 2. Ереван, Изд-во АН Арм. ССР, 1970, стр. 37.
4. И.Н. Мешков. Формирование интенсивных электронных пучков, Канд. диссерт., Новосибирск, 1970.
5. А.И. Аренштам, Г.И. Будкер, И.Н. Мешков, В.Г. Пономаренко, А.Н. Скринский. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, том. 2. М., ВИНТИ, 1970, стр. 400.

Дискуссия

М. Бартон. Достигли ли Вы энергии накопительного кольца 200 Мэв?

Р.А. Салимов. Конечная энергия ускоренных протонов - 200 Мэв. Начальная энергия - 1 Мэв. В ВЭПП-3 протоны захвачены, но пока не ускорены.

А.А. Коломенский. При равных скоростях протонов и электронов существенно возрастает сечение перезарядки (нейтрализация), и протоны теряются. Каковы Ваши оценки этого эффекта, и насколько он сказывается на эксперименте?

Р.А. Салимов. Перезарядка протонов на электронах будет использоваться как метод регистрации совпадения протонных и электронных пучков. Тем самым мы будем видеть, насколько хорошо мы совместили скорости и положения протонного и электронного пучков. По оценкам оказывается, что время исчезновения протонного пучка за счет рекомбинации при тех скоростях, которые мы ожидаем, составляет примерно 150 мин, а время затухания - 10 сек.

6. ВОЗМОЖНОСТЬ УСКОРЕНИЯ ПРОТОНОВ НА ЭНЕРГИЮ ВЫШЕ ЭНЕРГИИ ПОКОЯ В ИЗОХРОННОМ ЦИКЛОТРОНЕ

Л.А. Саркисян

(Радиотехнический институт АН СССР)

Теоретические и экспериментальные исследования динамики движения частиц в изохронных циклотронах с пространственной вариацией магнитного поля, проведенные в Дубне [1] и Окридже [2], показали, что при амплитуде радиальных колебаний в несколько сантиметров ($\sim 3,5$ см) и наборе частицей энергии за оборот ~ 300 кэв, внутренний нелинейный резонанс четвертого порядка ($p = \frac{N}{Q_r} = 4$), обусловленный периодичностью структуры магнитного поля практически приводит к полной потере пучка, и предельная энергия ускоренных протонов ограничена нелинейным резонансом $Q_r = 2$. В рамках линейной теории предельная кинетическая энергия протонов может быть оценена согласно выражению

$$W = E_0 \left(\frac{Q_r}{\sqrt{1 + \frac{3}{2N^2} \left(\frac{\epsilon_1 \nu}{N\lambda} \right)^2 \sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{\epsilon_m}{m\epsilon_1} \right)^2}} - 1 \right),$$

где E_0 - энергия покоя частицы; ϵ_1 и ϵ_m - глубина вариации основной и m -ой гармоник поля; λ - параметр спирали Архимеда; ν - текущий радиус ускорения.

В ускорителях со слабой аксиальной фокусировкой ($Q_z \sim 0,25$) предельная энергия составляет ~ 810 Мэв. Ускорение за радиус $Q_r = 2$ наряду с существенным снижением интенсивности пучка (амплитуда радиальных колебаний несколько миллиметров) [2] встречает трудности с формированием магнитного поля из-за возрастающей с радиусом нелинейностью среднего поля и вариации в одном ускорителе. Кроме того, существенно осложняется система вывода пучка из ускорителя и значительно падает ее эффективность.

Для осуществления ускорения протонов в циклотронном режиме на энергию свыше $\sim E_0(Q_r > 2)$ предлагается использовать каскадный метод ускорения, когда каждый предыдущий циклотрон является инжектором для последующего. В таком "каскадном изохронном циклотроне"

27. ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИВНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ НА УСКОРИТЕЛЕ РИУС-5

Е.А. Абрамян, С.Б. Вассерман, В.Г. Вотинцев, В.М. Долгушин, А.Н. Лукин, Б.Г. Шкляев

(Институт ядерной физики СО АН СССР)

Ускоритель РИУС-5, предназначенный для получения пучков релятивистских электронов в коротких (40–50 нсек) импульсах с токами до 30 ка, был построен и запущен в Институте ядерной физики СО АН СССР в 1969 г. [1].

В течение последнего года проводились работы по усовершенствованию конструкции ускорителя и исследованию параметров пучка. В настоящее время все узлы и системы ускорителя устойчиво работают при напряжении высоковольтного генератора до 8 Мв и напряжении на ускорительной трубке до 5 Мв. Частота следования импульсов – один в минуту (при работе с выпуском пучка в атмосферу).

Ускоритель выполнен по обычной для установок такого типа схеме: источник высокого напряжения, за-

75 см. Конструкция трубки сделана по типу разборных трубок, успешно работающих в импульсных ускорителях с термоэмиссионным катодом [2] с микросекундными импульсами напряжения. В соответствии с рекомендациями А. Уотсона [3] с вакуумной стороны поверхность изолятора сделана конической. Геометрия трубки в целом подбиралась на электролитической ванне таким образом, чтобы распределение напряжения по секциям было близким к равномерному.

Как указывалось выше, трубка успешно работает при напряжениях на ней до 5 Мв. Однако нет полной уверенности в том, что принятые материалы и геометрические формы изоляционных колец и металлических электродов являются оптимальными. В настоящее время

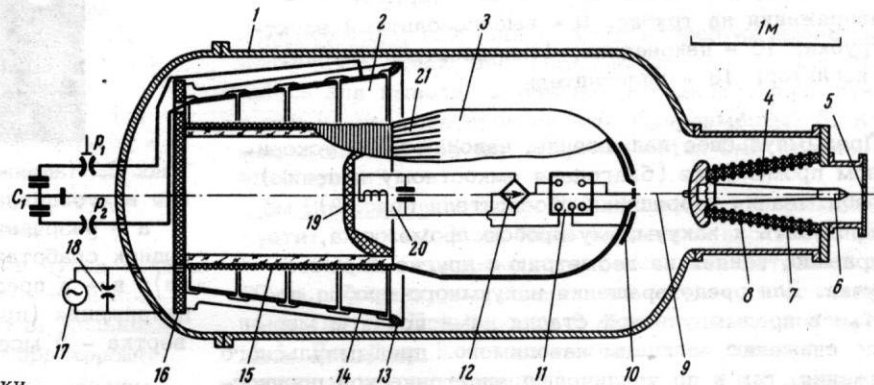


Рис. 1. Схематический разрез установки

1 – котел; 2 – трансформатор; 3 – высоковольтный электрод (кондуктор); 4 – ускорительная трубка; 5 – выпускное окно (анод); 6 – катод; 7 – изолятор; 8 – электрод трубки; 9 – разрядник-обостритель; 10 – емкостный делитель; 11 – блок поджига; 12 – выпрямитель; 13 – электрод; 14 – первичная обмотка; 15 – вторичная обмотка; 16 – изоляционное основание; 17 – генератор питания поджига; 18 – шунтирующий разрядник; 19 – электрод емкостной защиты; 20 – колебательный контур; 21 – “прозрачная” часть кондуктора; C_1 – конденсаторная батарея; P_1 и P_2 – воздушные разрядники.

ряжающий высоковольтную емкость, разрядник-обостритель с поджигом, ускорительная трубка с холодным катодом. В качестве источника высокого напряжения использован импульсный генератор на связанных контурах (трансформатор Тесла). Изолирующая среда – смесь азота и азота в отношении 1 : 1 при суммарном давлении 15 атм. Схематический разрез ускорителя показан на рис. 1. Описание конструкции и работы установки приведено в [1].

В докладе описаны новая конструкция и особенности работы секционированной ускорительной трубки и выпускного устройства с продольным магнитным полем, а также приведены результаты исследований ряда параметров и характеристик ускоренного пучка.

Ускорительная трубка и выпускное устройство

Ускорительная трубка (рис. 2) состоит из изоляционных колец, выполненных из оргстекла и разделенных электродами из дуралюминия с резиновыми уплотнениями стыков. Общее число секций – 13, длина трубки около

10 м. Начаты исследования электрической прочности различных по материалу, размерам и геометрии секций на высоковольтном (до 1 Мв) наносекундном стенде.

Необходимым условием нормальной работы ускорительной трубки является, как обычно, предварительная ее тренировка. Попытка провести тренировку трубки в рабочем режиме путем постепенного повышения напряжения не дала положительного результата: эффект тренировки отсутствовал. Энергия, выделяемая в этом случае в канале разряда, составляет ~ 1 кдж (при напряжении генератора ~ 3 Мв) и, по-видимому, чрезмерно велика. Успешная тренировка трубки осуществлена при параллельном соединении секций и присоединении их к высоковольтному электроду генератора. В этом случае энергия, выделяемая в канале разряда, не превышает 10 дж. Тренировка трубки непосредственно в ускорителе оказывается возможной благодаря тому, что напряжение генератора легко регулируется практически от нуля. В этом состоит одно из преимуществ импульсного генератора на связанных контурах по сравнению с генератором Маркса.

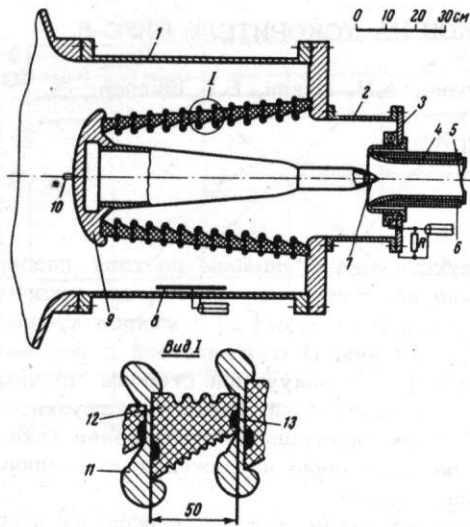


Рис. 2. Ускорительная трубка и выпускное устройство
 1 - корпус; 2 - вакуумная камера; 3 - пояс Роговского; 4 - корпус выпускного устройства; 5 - выпускное окно; 6 - соленоид; 7 - эмиттер; 8 - датчик напряжения на трубке; 9 - высоковольтный электрод трубки; 10 - наконечник; 11 - электрод трубки; 12 - изолятор; 13 - уплотнитель

Предимпульсное напряжение, наводимое на ускорительном промежутке (благодаря емкостному делению) до срабатывания разрядника-обострителя (рис. 3), может приводить к вакуумному пробоя промежутка, что, как правило, влияет на геометрию и другие параметры пучка. Для предотвращения вакуумного пробоя промежутка в предимпульсной стадии нами приняты меры как по снижению величины наводимого предимпульсного напряжения, так и по увеличению электрической прочности ускорительного промежутка.

С целью уменьшения потенциала, наводимого, на высоковольтный электрод 9 трубки (рис. 2), последний смещается в глубь корпуса 1, при этом зазор разрядника-обострителя 9 (рис. 1) увеличивается. Для согласования электрической прочности разрядника-обострителя с прочностью высоковольтного зазора генератора используется наконечник 10 (рис. 2). Величина наводимого напряжения на трубку составляет $\sim 2,5\%$ от высокого напряжения генератора.

Выпускное устройство трубки, показанное на рис. 2, позволяет располагать окно 5 на значительном расстоянии от эмиттера при достаточно высоких напряжениях электрического поля на катоде. Продольное магнитное поле, образованное соленоидом 6, плавно нарастает по величине до 3-4 кгс и далее остается приблизительно постоянным вплоть до выпускного окна. Расходящийся с катода пучок становится затем параллельным. Такое выпускное устройство имеет существенные преимущества перед обычной системой выпуска (см. рис. 1). Размер пучка на аноде можно легко регулировать; электрическая прочность промежутка в предимпульсной стадии заметно возрастает, препятствуя пробоям ("срывам" наведенного на трубку напряжения); процессы на аноде, обусловленные бомбардировкой электронным пучком, слабее сказываются на снижении сопротивления промежутка катод-анод; изолятор трубки значительно лучше экранирован от запыления металлом, летящим с анода.

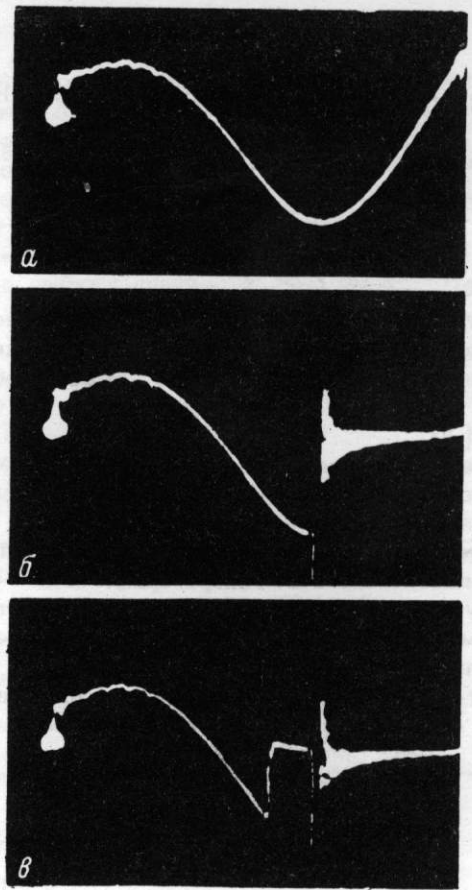


Рис. 3. Напряжение на ускорительной трубке в течение всего цикла работы установки

а - разрядник-обостритель не сработал; б - разрядник сработал (виден скачок напряжения на трубке); в - в предимпульсной стадии произошел "срыв" напряжения (пробой вакуумного промежутка). Развертка - 5 мсек/см

Первые испытания выпускного устройства с продольным нарастающим магнитным полем прошли успешно.

Результаты измерений параметров пучка

Типичные осциллограммы импульсов ускоряющего напряжения и тока (система выпуска обычная) показаны на рис. 4. При величине зазора эмиттер-анод 4 см и напряжении генератора 8 Мв амплитуды тока пучка и ускоряющего напряжения составляют 50 ка и 3,5 Мв. Энергия пучка в импульсе, измеренная калориметром, установленным за фольгой, равна 3 кдж.

Изменения, происходящие в ускорительном промежутке в период прохождения пучка электронов, объясняют более высокие значения тока в середине и конце импульса по сравнению с током в начале импульса при тех же напряжениях. Максимальное напряжение на промежутке достигается через 15 нсек с начала импульса, и можно, по-видимому, считать, что к этому моменту характеристики пучка еще определяются только эмиссионными свойствами катода и геометрией ускорительного промежутка. Значения тока пучка при максимальном ускоряющем напряжении в диапазоне $U_m = 1 - 4$ Мв хорошо аппроксимируются зависимостью

$$I_m = k U_m^{5/2},$$

где k - коэффициент, зависящий от геометрии промежутка, эмиттера и материала последнего. Для эмитте-

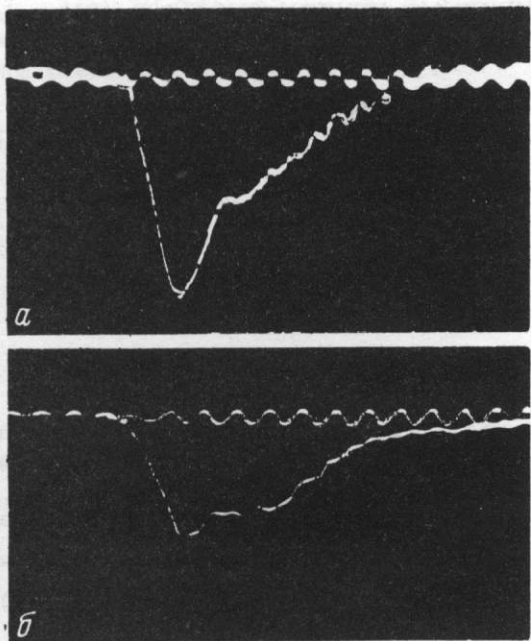


Рис. 4. Форма импульсов ускоряющего напряжения (а) и тока (б) пучка. Метки - 100 МГц

ра из нержавеющей стали, форма которого показана на рис. 5, б, при величине зазора до анода 4 см $k = 2,240^{-12}$ а/в. Следует отметить, что чистота поверхности эмиттера и вид кромок (острые или притупленные) заметно на величину k не влияют.

На рис. 5 показаны поперечные сечения пучка электронов на аноде при максимальном ускоряющем напряжении в импульсе для различных эмиттеров. Кольцевая форма сечения пучка с конического эмиттера хорошо известна. Ожидаемые на этом основании раздвоение пучка на кольцевой кромке и возможность изменения диаметра пучка за счет наклона кромок подтвердились при исследовании эмиттеров, форма которых приведена на рис. 5, б и в. Конфигурация сечений пучка наблюдалась на стеклянных пластинах, которые ставились за

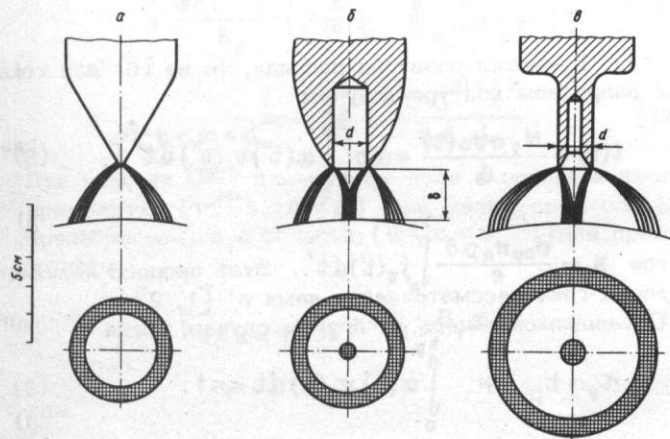


Рис. 5. Траектории электронов и форма пучка на аноде для различных эмиттеров. Энергия электронов $W_e = 1 + 1,5$ Мэв, $\delta = 2$ см; $d = 1,2$ см

алюминиевыми фильтрами, пропускавшими только электроны максимальных энергий. С возрастанием энергии электронов диаметр пучка уменьшается.

Литература

1. Е.А. Абрамян и др. Докл. АН СССР, 1970, 192, № 1, стр. 76.
2. Е.А. Абрамян, С.Б. Вассерман. "Атомная энергия", 1967, 23, вып. 1, стр. 44.
3. A. Watson. J. Appl. Phys., 1967, 38, N 5, p. 2019.

Дискуссия

А.Н. Лебедев. 1. В какой области энергий наблюдался закон 5/2 и какой величины магнитное поле использовалось для вывода? 2. Каково собственное поле пучка, и при каком токе проводились эксперименты? 3. Каков максимальный ток для энергии 5 Мэв был получен на этой пушке?

С.В. Вассерман. 1. Закон 5/2 наблюдался в области энергий от 1 до 3,5 Мэв. Поле нарастало вдоль оси пучка до 4 кгс. 2. Эксперименты проводились с токами до 20 ка. Величину магнитного поля пучка, к сожалению, не помню. 3. При энергии 5 Мэв ток был около 30 ка.

А.А. Воробьев. Как отличается ток от импульса к импульсу и какова длительность непрерывной работы этой установки, определяемая тепловым режимом?

С.Б. Вассерман. Разброс от импульса к импульсу в пределах 5%. Так как машина работает с частотой повторения 1 раз в минуту, то вопроса о тепловых перегрузках не возникало.

И.М. Ройфе. Из какого материала изготовлена трубка? Не собираетесь ли Вы уменьшать длительность фронта?

С.Б. Вассерман. Для изоляционных колец используется оргстекло. Электроды изготовлены из дюралюминия. Фронт в настоящее время равен 15 нсек, и для наших целей нет необходимости его укорачивать.

Б.Н. Яблоков. Какое время задержки между импульсом триггера и основным разрядом на трубку?

С.Б. Вассерман. Время задержки не измерялось, но стабильность срабатывания хорошая.

Н.В. Плешивцев. 1. Каковы геометрические размеры катода и его материал? 2. Работали ли Вы в режиме с напряжением меньше 1 Мв?

С.Б. Вассерман. 1. Катод изготовлен из нержавеющей стали и представляет собой конус с различными углами. Обычно угол - 60° и длина - 3 см. Наконечник имел закругление. 2. Нет, не работали.

К.В. Ходатаев. Какую долю энергии уносит пучок по сравнению с энергией, запасенной в батарее?

С.Б. Вассерман. В максимальном режиме энергия батарей 10 кдж, на высоковольтном электроде - 7 кдж, в пучке - 3 кдж.

О.Я. Савченко

(Институт ядерной физики СО АН СССР)

Ионный ток, формируемый из плазмы системой обычных электродов, ограничивается обычно пространственным зарядом пучка. Для уменьшения влияния эффекта пространственного заряда нами использовались электроды в виде двух мелкоячеистых сеток [1-3]. Первая сетка находилась под положительным потенциалом плазмы, вторая сетка заземлялась. Межсеточное расстояние было много больше размера ячейки и много меньше диаметра сеточных полотен. Поэтому такая система формирует почти параллельный поток ионов. Вторая сетка, как правило, соединялась с металлической трубкой, в которой, благодаря напуску газа, создавались условия почти полной компенсации пространственного заряда пучка. Поэтому эффект пространственного заряда имел место только в малом объеме межсеточного промежутка. В оптимальном режиме формирования пучка плазма не проникала в межсеточный промежуток: плазма "рассасывалась" электрическим полем вблизи первой сетки на глубине порядка размеров ячейки (рис. 1). Конечный радиус кривизны границы плазмы, неоднородность электрического

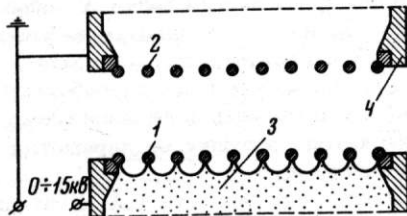


Рис. 1. Сеточные электроды: 1 - первая сетка; 2 - вторая сетка; 3 - плазма; 4 - металлическая трубка

поля вблизи ячеек первой сетки вызывают расходимость пучка. Для оценки этого эффекта использовались сеточные электроды в виде параллельных никелевых проволок с диаметром 0,05 мм и шагом 0,25 мм. Диаметр полотна сеток менялся от 8 до 37 мм, расстояние между сетками было около 4 мм. В основном исследовались протонные пучки, в которых этот эффект детектировался по распределению интенсивности в пучке H^+ , H^0 и H^- . На рис. 2 приводится распределение интенсивности в пучке ионов H^+ в направлении вдоль (сплошная кривая) и поперек (штриховая кривая) направлению нитей первой сетки. Детектор расположен на расстоянии около метра от места формирования пучка, начальный диаметр пучка - 8 мм. Как следует из этого рисунка, расходимость, вызванная полем первой сетки, соизмерима с изотропной частью расходимости и составляет около 0,015 радиана. Анизотропная часть расходимости слабо зависит как от тока в пучке, так и от межэлектродного напряжения, но сильно зависит от межсеточного расстояния. Изотропная часть расходимости пучка (вызванная, по-видимому, тепловым

разбросом энергий протонов, отбираемых из плазмы) в оптимальном режиме не зависит от условий формирования пучка.

Выбранный нами способ компенсации пространственного заряда с использованием газовой мишени дает, по-видимому, почти полную компенсацию пространственного заряда пучка в пространстве за второй сеткой. Это утверждение иллюстрирует рис. 3, на котором показана зависимость протонного тока пучка от отбора протонов из плазмы при разных давлениях водорода в трубке. Из рисунка видно, что при давлениях выше $4 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст. вплоть до протонных токов 1 а сохраняется линейная зависимость: величины ионного тока от отбора ионов из плазмы (сплошная кривая). Диаметр пучка равен 37 мм. Вычисления дают, что степень недокомпенсации такого пучка была не больше 0,1%. Однако, если уменьшить давление газа в трубке до 10^{-3} мм рт.ст., то протонный ток резко уменьшится, линейная зависимость тока в пучке от величины отбора протонов из плазмы исчезнет (штриховая кривая на рис. 3). Грубая оценка по этим эффектам дает величину недокомпенсации $\sim 0,5\%$. По-видимому, для разных газов

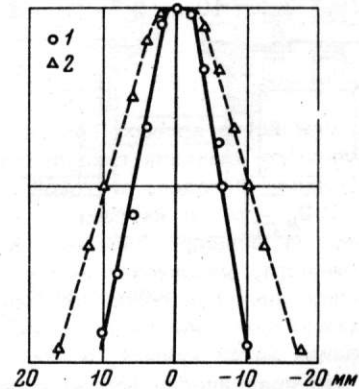


Рис. 2. Распределение интенсивностей H^+ поперек пучка 1 - вдоль направления нитей первой сетки; 2 - поперек направления нитей первой сетки

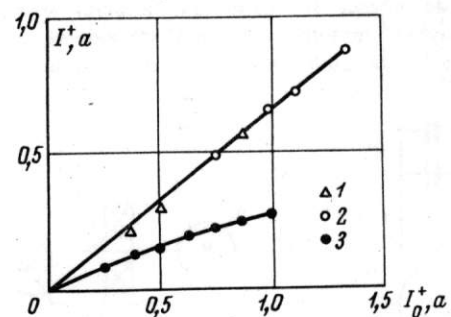


Рис. 3. Зависимость протонного тока в пучке от отбора протонов из плазмы 1 - давление газа в трубке $1 \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст.; 2 - давление газа в трубке $4 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст.; 3 - давление газа в трубке $1 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст.

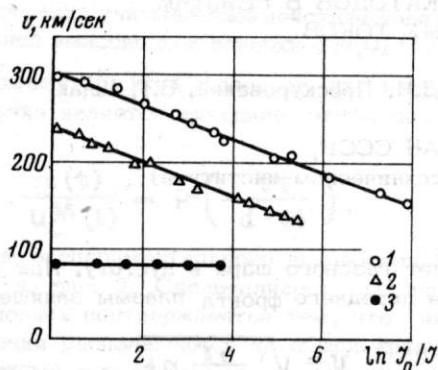


Рис. 4. Зависимость скоростей ионов на выходе из трубки от степени их рассеяния на газовых мишенях (J_0 - поток частиц на входе в трубку; J - на выходе из трубки)

1 - поток ионов N^+ , проходящих через водородную газовую мишень; 2 - поток ионов N^+ , проходящих через аргоновую газовую мишень; 3 - поток ионов Ar^+ , проходящих через аргоновую газовую мишень

механизм компенсации неодинаков. На это указывает, например, разный характер тока на трубку в зависимости от рода ионов: для протонного пучка ток на трубку положителен и грубо равен разности протонного тока на входе и на выходе трубки, а при прохождении через трубку пучка ионов N^+ ток на трубку отрицателен и лишь по порядку величины совпадает с разностью входного и выходного тока ионов N^+ [3].

Основным недостатком сеточных электродов является их малая механическая прочность по отношению к пробое межсеточного промежутка. Поэтому сеточные электроды требуют тщательной тренировки второй сетки. Тренировка проводилась следующим образом. При напряжении в межсеточном промежутке 200-400 в система работает до тех пор, пока процент пробоев не уменьшится до 40-50. После этого напряжение повышается до 3-5 кв. Если через несколько десятков импульсов (длительность импульса 200 мксек, частота повторения 0,2 сек⁻¹) пробой промежутка исчезает, можно считать, что процесс тренировки закончен. Обычно тренировка новой сетки длится 2-4 часа. В процессе тренировки вторая сетка покрывается темным налетом и коэффициент вторичной эмиссии с нее падает в 2-3 раза (при 5-8 кв). Поэтому можно предполагать, что процесс тренировки заключается в резком уменьшении вторичной электронной эмиссии, которая является причиной пробоя межсеточного промежутка. Возможно, уменьшение вторичной эмиссии связано как с изменением характера эмитирующей поверхности, так и с возникновением локальных электрических полей на нитях второй сетки, препятствующих попаданию на нее быстрых ионов.

При формировании ионных пучков широко использовались газовые мишени [3]. Поэтому дополнительно

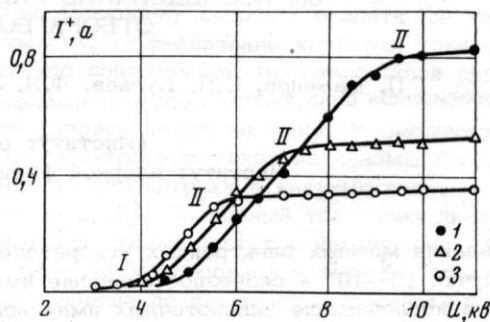


Рис. 5. Зависимость протонных токов в пучке от межсеточного напряжения

1 - отбор протонов из плазмы - 1а; 2 - отбор протонов из плазмы - 0,6а; 3 - отбор протонов из плазмы - 0,4а

исследовалось замедление ионов, вызываемое газом в трубке. На рис. 4 показана одна из зависимостей потери скорости частиц от логарифма отношения интенсивностей потока частиц на входе и выходе из трубки. Последняя величина пропорциональна давлению газа. Из этих результатов видно, что при оптимальных давлениях газа (3-6.10⁻³ мм рт.ст) потеря энергии частиц не больше нескольких электронов вольт.

Типичные зависимости протонного тока в пучке, сформированном сетками с диаметром полотна 37 мм, от величины межсеточного напряжения показаны на рис. 5. Три разные кривые отвечают разным величинам отбора протонов из плазмы - 0,4, 0,6 и 1 а. Ход графиков качественно объясняется следующим образом. От точки 1 плазма из плазменного источника доходит до второй сетки и поэтому пучок не формируется; в интервале 1-2 граница плазмы с увеличением напряжения перемещается от второй сетки к первой - дефокусирующее влияние второй сетки и плазменной границы уменьшается, и ток возрастает. В точке 2 плазма достигает первой сетки; дальнейшее слабое возрастание тока в пучке связано, по-видимому, с уменьшением влияния на расходимость пучка его пространственного заряда. Максимальные токи, полученные нами с использованием сеточных электродов, следующие: ток H^+ - 1,2 а, ток He^+ - 0,5 а, ток N^+ - 150 ма, ток Ar^+ - 70 ма.

Литература

1. Г.И. Димов, Ю.Г. Кононенко, О.Я. Савченко, В.Г. Шамовский. ЖТФ, 1968, **38**, 997.
2. Г.И. Димов, О.Я. Савченко. ЖТФ, 1968, **39**, 2002.
3. О.Я. Савченко. ЖТФ, 1970, **40**, 305.

1 мм. Диапазон перемещения по вертикали 150 мм с шагом 25 мм. Точки измерения по азимуту распределены равномерно, число точек измерения может равняться 100, 50, 25, 20 или 10. Точность установки координат датчиков составляет по радиусу и высоте 0,1 мм, по азимуту 0,1°. Управление перемещением по всем координатам, индикация положения датчиков (R, θ, z), запуск измерителей и цифровая печать производятся устройством управления, блок-схема которого приведена на рис.5. Положение датчика по каждой из координат определяется реверсивным счетчиком, считающим число точек по числу замыканий ключа, происходящих при прохождении точки измерения. Измерения ЯМ могут производиться автоматически по заранее выбранной программе.

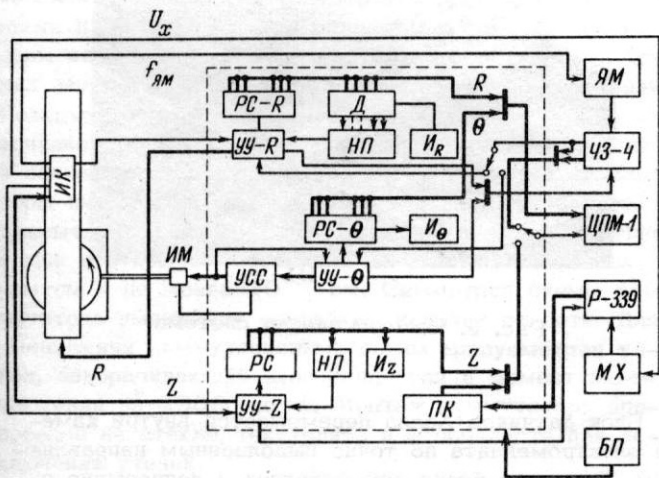


Рис. 5. Блок-схема устройства управления

РС - реверсивный счетчик; Д - дешифратор; НП - наборное поле; И - индикация; УУ - блок логики управления перемещением; УСС - усилитель следящей системы; ИМ - исполнительный механизм следящей системы; ИК - измерительная каретка; БП - блок питания; ЯМ - ядерный магнитометр; МХ - магнитометр Холла; ЦПМ - 1 - печатающее устройство; ЧЗ-4 - электронный частотомер; ПК - преобразователь кода Р-339

Скорость автоматических измерений ЯМ по радиусу 15 измерений в минуту, по азимуту - 25 измерений в минуту (при измерениях в 100 точках). Скорость измерений магнитометрами Холла - 140 измерений в час. Измерения ведутся одним оператором с пульта, удаленного на 20 м от измеряемого поля. После введения ряда изменений, связанных с охлаждением датчиков ЯМ, ИМП и двигателей, находящихся в зазоре магнита, появилась возможность применить аппаратуру для контрольных измерений топографии поля при вакууме в ускорительной камере [4].

Измерительный комплекс весьма эффективен при формировании основного поля синхроциклотрона. С его помощью удалось сформировать поле семиметрового синхроциклотрона с относительной амплитудой первой гармоники $\leq 2 \cdot 10^{-4}$ и отклонением медианной плоскости от среднегеометрической ≤ 1 см. С его помощью были также сформированы поля магнитного канала и регенератора в высокоэффективной системе вывода [5,6].

Литература

1. И.И.Ткач. Ядерный магнитометр с автоматической подстройкой. Препринт ФТИ, ОЗ9, Л., 1967.
2. Н.К.Абросимов, В.А.Елисеев, Г.А.Рябов. Прибор для измерений положения медианной поверхности. Препринт ФТИ, О40, Л., 1967.
3. Н.К.Абросимов, В.А.Елисеев, Г.А.Рябов, И.И.Ткач. Приборы и техника эксперимента, 1968, № 6, стр.217.
4. Н.К.Абросимов, В.А.Елисеев, И.А.Петров, Г.А.Рябов, И.И.Ткач, Н.Н.Чернов. Магнитные измерения на синхроциклотроне ФТИ при вакууме в ускорительной камере. Препринт ФТИ, 131. Л., 1968.
5. Н.К.Абросимов, Д.Г.Алхазов, С.П.Дмитриев и др. Синхроциклотрон ФТИ АН СССР на энергию ускоренных протонов 1 ГэВ. Доклад на Международной конференции по ускорителям заряженных частиц. Ереван, 1969.
6. Н.К.Абросимов, В.А.Волченков, В.А.Елисеев, Г.А.Рябов, Н.Н.Чернов. Вывод протонного пучка синхроциклотрона ФТИ АН СССР на энергию протонов 1 ГэВ (см. наст.сб., т.1).

43. АППАРАТУРА ДЛЯ МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В ЭЛЕКТРОМАГНИТЕ ВАПП -4

Б.А.Баклаков, В.Ф.Веремеенко, М.М.Карлинер, Э.А.Купер,
Б.В.Левичев, А.Д.Орешков, И.Я.Протопопов

(Институт ядерной физики СО АН СССР)

В связи с большим объемом магнитных измерений электромагнита протон-антипротонного накопителя ВАПП-4 в Институте ядерной физики (г.Новосибирск) была разработана и изготовлена усовершенствованная измерительная аппаратура, в которой для измерения

магнитного поля используются датчики Холла, распределенные по рабочей области сечения магнита. Применение коммутатора на полевых транзисторах и использование непосредственной связи с ЭВМ позволило резко увеличить быстродействие системы по сравнению с системой, описанной в работе [1].

В качестве измерительных элементов используются датчики Холла, разработанные в СКБ ИПАН СССР (г. Ленинград). Типовые характеристики датчиков приведены ниже:

Чувствительность датчиков при рабочем токе, мкВ/э	10 - 15
Рабочий ток, ма	160
Температурный коэффициент чувствительности, %/°С	0,01-0,03
Входное и выходное сопротивление, ом.	1 - 3
Э.д.с. неэквипотенциальности при рабочем токе, мкВ	±100
Температурный коэффициент э.д.с. неэквипотенциальности, мкВ/°С	1 - 2
Рабочая площадь датчика, мм × мм	1,5 × 0,5

Эти датчики отличаются малым дрейфом э.д.с. неэквипотенциальности и слабой квадратичной зависимостью ее от тангенциальной составляющей магнитного поля [2]. Калибровка датчиков производится в специальном градуировочном магните, поле которого стабилизировано с помощью ядерного магнитометра с точностью не хуже $\pm 1 \cdot 10^{-4}$.

Блок датчиков Холла выполнен аналогично описанному в работе [1]. Десять датчиков измеряют вертикальную компоненту магнитного поля (два ряда по 5 датчиков), два датчика - радиальную. Кроме них, в блок вмонтированы термосопротивления, сигналы с которых используют в ЭВМ для внесения температурной поправки, что позволило отказаться от термостатирования.

Блок-схема измерительной системы показана на рис.1, а ее общий вид - на рис.2.

Датчики Холла соединены последовательно и питаются от одного источника стабильного тока с долговременной нестабильностью менее $\pm (2 - 3) \cdot 10^{-4}$. Схема генератора тока изолирована и имеет малую емкость по отношению к земле и питающей сети (200 пф).

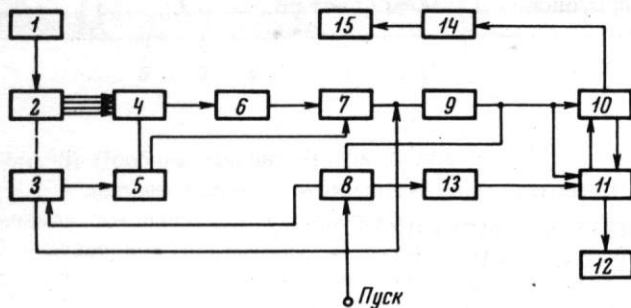


Рис. 1. Блок-схема измерительной системы:

1 - генератор тока; 2 - блок датчиков Холла; 3 - блок перемещения и измерения координаты; 4 - коммутатор; 5 - программатор; 6 - усилитель постоянного тока; 7 - цифровой вольтметр; 8 - блок исходных данных; 9 - преобразователь кода; 10 - вычислительная машина "Минск-22"; 11 - буфер; 12 - магнитофон; 13 - блок управления записью; 14 - преобразователь кода; 15 - электрическая пишущая машина

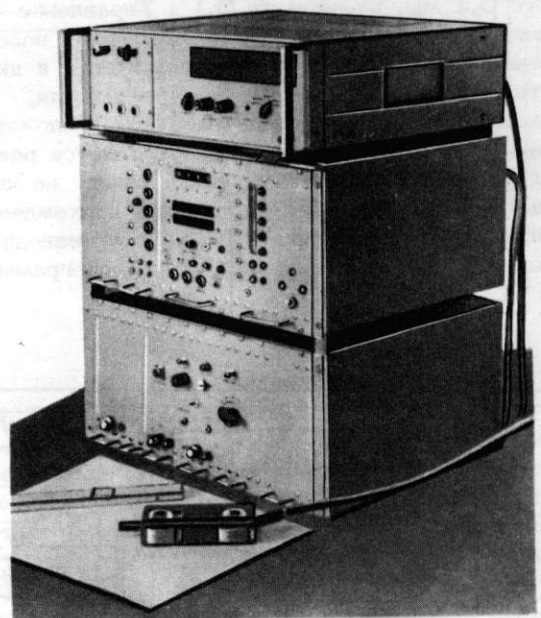


Рис. 2. Измерительная система

Блок датчиков Холла перемещается внутри камеры электромагнита по точно выполненным направляющим. Движение блока осуществляется непрерывно с помощью винта длиной около 4 м, с которым механически связан световой датчик продольной координаты. Точность определения координаты $\pm 0,1$ мм. Формирующее устройство светового датчика выдает импульсы синхронизации через 1 см пути, пройденного блоком датчиков.

Выходы датчиков поочередно подключаются при помощи коммутатора на полевых транзисторах к прецизионному усилителю постоянного тока. Схема коммутатора приведена на рис.3.

Включение любого датчика (ДХ1, ДХ2 и т.д. на рис.3) осуществляется при замыкании двух ключей на

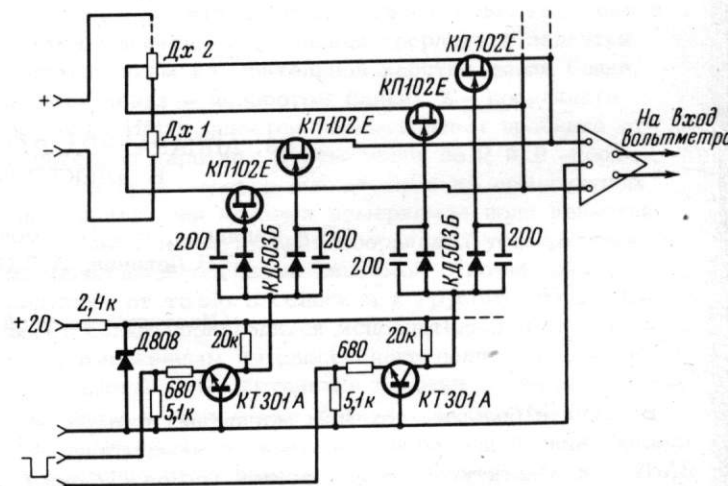


Рис. 3. Схема коммутатора на полевых транзисторах

Время одного измерения равно 40 мксек, время измерения в одном сечении (т.е. длительность цикла) - 640 мсек. Измерение производится без остановки блока датчиков, который проходит путь длиной 0,5 см за полный цикл. На рис.5 показана временная диаграмма работы системы с частотой 25 гц. Работа системы синхронизирована с частотой питающей сети. Предусмотрены режимы внешнего ручного и автоматического запусков. В момент начала цикла в ЭВМ посылаются значения координаты блока датчиков.

Перед началом измерений блоком исходных данных в ЭВМ посылаются следующие данные: стандартный код, означающий начало очередного измерения; номер измерения; номер магнита; дата измерения; шифр оператора, производящего измерения; резервная информация.

Благодаря тому, что в течение цикла измерений в одном сечении электромагнита в ЭВМ заносятся значения нуля и коэффициента усиления усилителя, а также тока датчиков Холла, существенно снижа-

ются требования на долговременную стабильность этих параметров.

Суммарная погрешность данной измерительной системы не превышает $\pm (3-5) \cdot 10^{-4}$.

Литература

1. Б.А.Баклаков, М.М.Карлинер, Б.В.Левичев, А.С.Медведко, И.Я.Протопопов. Устройство для прецизионных измерений магнитного поля в электромагните накопителя. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М., 9-16 октября 1968. Том 1. М., ВИНТИ, 1970, стр.674.
2. Б.А.Баклаков, М.К.Карлинер, Б.В.Левичев, А.С.Медведко, И.Я.Протопопов. Применение датчиков Холла для прецизионных измерений магнитного поля. Препринт ИЯФ 9-70 АН СССР, Новосибирск, 1970.

44. ФОРМИРОВАНИЕ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ ТОКА В УДАРНОМ МАГНИТЕ С КОМПЛЕКСНЫМ ВХОДНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИСКУССТВЕННОЙ ЛИНИИ

И.Ю.Бенескриптов, С.М.Клишевский, Б.А.Ларионов

(Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им.Д.В.Ефремова)

Проведение целого ряда экспериментов на современных ускорителях требует создания систем импульсной коммутации пучков, обеспечивающих высокоэффективный вывод части или всего ускоренного пучка. Одним из основных элементов такой системы является ударный магнит, который обеспечивает необходимое угловое отклонение пучка, причем поле в апертуре магнита для эффективности вывода 100% должно нарастать до номинального значения и спадать до нуля за время меньшее, чем временной интервал между соседними банчами, т.е. за время порядка 10^{-7} сек, при длительности импульса $\sim 5 \cdot 10^{-6}$ сек.

В известных системах [1,2] в качестве импульсного магнита используется магнит, представляющий собой линию задержки с импедансом, равным импедансу формирующей линии. Для формирования заднего фронта импульса в указанных схемах используется специальный разрядник, закорачивающий вход передающего кабеля непосредственно перед окончанием импульса от формирующей линии.

Несмотря на простоту схемы формирования и хорошие параметры формируемого импульса, схема с магнитом типа линии задержки имеет ряд недостатков, основным из которых является чрезмерная конструктивная сложность магнита, особенно при низком исполнении.

Значительно более простым по конструкции является магнит типа сосредоточенной индуктивности, ко-

торый был впервые применен в системе быстрого вывода в Брукхейвене [3]. Однако в предложенной в Брукхейвене схеме формирования параметры импульса, формируемого в магните, значительно уступают аналогичным схемам формирования при использовании в них магнита типа линии задержки. Кроме того, эта схема не обеспечивает возможности формирования заднего фронта импульса.

Указанные недостатки устранены в схеме, показанной на рис.1.

Правильным выбором корректирующей емкости C_k можно получить при допустимом выбросе на вершине импульса Δi передний фронт импульса t_ϕ не хуже, чем при использовании магнита типа линии задержки.

Для схемы рис.1 передний фронт импульса тока в индуктивности определяется выражением:

$$t_\phi = \frac{2\tau\tau'}{\sqrt{8\tau\tau' - (\tau + \tau')^2}} \left(\frac{\pi}{2} + \alpha \tau \operatorname{ctg} \frac{\tau - 3\tau'}{\sqrt{8\tau\tau' - (\tau + \tau')^2}} \right), \quad (1)$$

где

$$\tau = \frac{L_M}{R_H}; \quad \tau' = R_H C_k,$$

Оптимальный набор секторных шимм для компенсации уровня поля 100 э (рис.5) находился путем расчета на ЭВМ методом проб. Шиммы, оказавшиеся необходимыми для компенсации $\Delta H(\nu)$, на рис.5 заштрихованы. В средней части рисунка приведены распределения полей для различных слоев секторных шимм. За исключением отдельных выбросов, связанных с ошибками измерения поля на модели, отклонения поля в области шиммирования не превышают 18 э.

Таким образом, показана возможность создания магнитного поля ускорителя с заданными допусками.

Литература

1. H.G.Blosser. IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1969, NS-16, N 3, p.405.

2. А.А.Глазов и др. Препринт ОИЯИ, 9-3951, Дубна, 1968.
3. R. Cohen a. oth. IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1969, NS-16, N 3, p.421.
4. H.Kim, D. Le Vine and M.Reiser. Internat. Conf. on Cycl., Oxford, 1969.
5. С.Б.Ворожцов, Н.И.Дьяков, Н.Л.Заплатин. Препринт ОИЯИ, 9-4517, Дубна, 1969.
6. V.P. Dmitrievsky a.oth. Internat. Conf. on Cycl., Oxford, 1969.
7. Ю.Г.Аленицкий, С.Б.Ворожцов, Н.Л.Заплатин, Л.К.Лыткин. Препринт ОИЯИ "Моделирование магнитной системы фазотрона с пространственной вариацией поля". Дубна, 1970.
8. В.Н.Аносов, Ю.Н.Денисов, П.Т.Шишляников. Препринт ОИЯИ, 10-4930, Дубна, 1970.

50. ИМПУЛЬСНЫЙ ГЕНЕРАТОР МОЩНОСТЬЮ 1,5-2 ГВТ НА МАГНИТОУПРАВЛЯЕМЫХ ВЕНТИЛЯХ

Л.Л.Данилов, В.Н.Пажкин, Г.И.Сильвестров

(Институт ядерной физики СО АН СССР)

Современное развитие импульсной техники в области получения сильных магнитных полей (100-200 кэ) требует создания генераторов тока на реактивные мощности в несколько гигаватт в диапазоне длительностей импульсов от нескольких десятков микросекунд до нескольких миллисекунд. Так, для оптики конверсии позитронов на поворотно-фокусирующих магнитах комплекса ВЭПП-3 [1] и мезонного канала на параболических линзах для нейтринного эксперимента в ИФВЭ [2] (импульсные поля ~120 кэ) требуется генератор с реактивной мощностью 1,5 Гвт при длительности импульса 100-200 мксек. Принципиальным при разработке таких генераторов является вопрос о коммутирующем устройстве и его максимальных импульсных параметрах - электрической прочности, вентильной прочности и предельного импульсного тока.

Использование промышленных вентилях в режиме перегрузки по импульсному току позволяет в ограниченном диапазоне длительностей импульсов коммутировать реактивные мощности порядка 5 Мвт для кремниевых (ВКДУ-150), 10 Мвт для ртутных (ТР 80/16) вентилях при $\tau \sim 0,7-1,5$ мксек и 10 Мвт для водородных вентилях (ТГИ1-2500/35) при ~1-5 мксек. Желание расширить диапазон длительностей в области 50-500 мксек (где ртутные вентили практически не работают, а надежность работы кремниевых резко падает) приводит к значительному уменьшению коммутируемой реактивной мощности. Например, для ТГИ1-2500/35 при $\tau \sim 100$ мксек реактивная мощность составляет 20 Мвт [3]. Это приводит к необходимости последовательно-параллельного включения большого количества вентилях.

В ИЯФ СО АН СССР создан нестандартный газоразрядный вентиль, управляемый с помощью магнитного поля в широком диапазоне длительностей им-

пульса от 50 мксек до 2 мксек [4]. Дальнейшая разработка этого прибора позволила создать вентиль, который способен коммутировать реактивную мощность в 1 Гвт в требуемом для наших целей интервале длительностей импульсов. Прибор условно назван "Магутрон" - магнитоуправляемый тиратрон. В нем применена схема последовательного соединения накопительных емкостей, разделенных вентилями, с одним источником питания и одной системой стабилизации.

Принципиальная схема генератора приведена на рис.1. При работе на нагрузку генератор представляет собой несимметричную относительно точки заземления схему последовательного соединения двух накопительных емкостей, разделенных вентилями, с суммарным действующим напряжением $2U_0$. При зарядке до напряжения U_0 от одного источника питания накопительные емкости соединены параллельно. Для оптимального согласования генератора с индуктивной нагрузкой применен импульсный трансформатор с малой ($\sim 4 \div 5$ мГн) индуктивностью рассеяния и током во вторичной обмотке порядка одного мегаампера.

Для кратковременной стабилизации амплитуды тока в нагрузке и компенсации медленных уходов параметров генератора и нагрузки во времени применяется специальная схема, обеспечивающая стабилизацию напряжения на накопительных емкостях с точностью лучше $1 \cdot 10^{-3}$ [5].

Для устранения влияния временной нестабильности, связанной с нестабильностью поджига вентилях ± 1 мксек, в нагрузке формируется импульс тока с плоской вершиной с точностью $\sim 0,1\%$ в пределах ± 10 мксек [3]. Запуск генератора осуществляется от стандартной схемы поджига через согласующий кабельный трансформатор (Тр2). Нагрузкой генератора поджига служат обмотки управления вентилями.

Рекуперация энергии происходит через перезарядные диоды $D_1 - D_{14}$.

Так как катод вентиля M_1 находится под высоким напряжением, то для защиты амплитуды от возможных пробоев по газовому промежутку разработана специальная вакуумная развязка.

Осциллографирование импульсов тока управления и рабочего тока осуществляется с помощью безындуктивных низкоомных шунтов и пояса Роговского. Падение напряжения на заземленном вентиле определялось

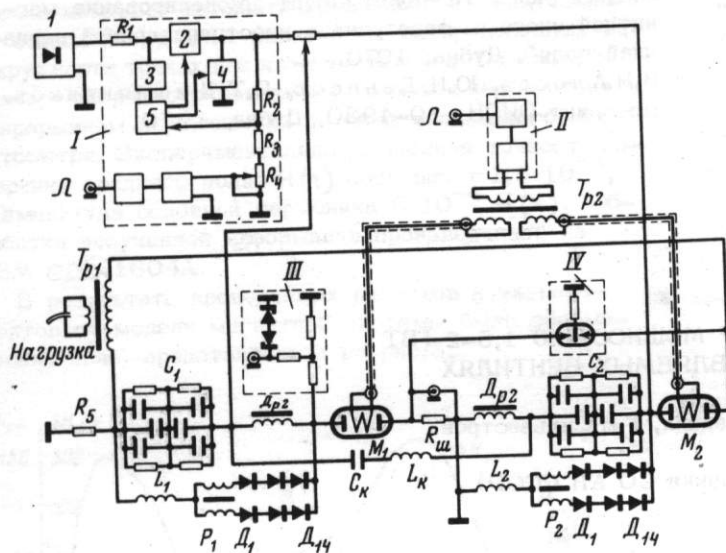


Рис. 1. Схема импульсного генератора

1 - выпрямитель; 2 - схема стабилизации; 3 - генератор магнитного поджига; 4 - делитель напряжения; 5 - вакуумная развязка; C_1, C_2 - накопительная емкость; M_1, M_2 - вентиль; D_{p1}, D_{p2} - дроссель насыщения; R_1 - зарядное сопротивление; $R_{ш}$ - измерительный шунт; D_1, D_{14} - перезарядные диоды; L_1, L_2 - перезарядная индуктивность; P_1, P_2 - реактор анодный; $C_K L_K$ - контур коррекции вершины импульса; T_{p1} - согласующий трансформатор; T_{p2} - трансформатор поджига; R_5 - развязывающее сопротивление

с помощью параллельно включенного компенсированного делителя с опорными стабилизаторами.

Конструкция магнетронов, работающих в схеме генератора, приведена на рис.2. Электроды выполнены из нержавеющей стали в виде двух длинных ~ 80 см цилиндров диаметром ~ 20 см, изолированных между собой разрядным газовым промежутком ~ 10 мм. Прибор наполняется водородом низкого давления $\sim 10^{-1} - 10^{-2}$ тор. Натекание и откачка водорода производятся симметрично по всему диаметру торцов прибора. На торцах электроды плавно переходят в токоподвод; коммутируемый ток рабочего контура подводится симметрично. Катод выполнен тонкостенным (~ 1 мм). На наружной поверхности катода нарезаны винтовые канавки, в которые укладывается обмотка управления, изолированная от катода. Протекающий по обмотке импульсный ток создает в рабочем зазоре магнитное поле управления. Иницирование дугового разряда в приборе осуществляется с помощью тлеющего разряда высокой (~ 5 а/см²) плотности тока.

При значительной протяженности прибора важным становится создание таких условий для разряда, при которых работала бы вся поверхность электродов, расположенная под обмоткой управления. Такие условия создаются как конструкцией обмотки управления, так и схемным решением - применением дросселя насыщения.

Бифилярная обмотка создает знакопеременное аксиальное винтовое магнитное поле управления, что при ее правильной полярности заставляет разряд двигаться в нужном направлении. Дроссели насыщения (D_{p1}, D_{p2}) позволяют затянуть длительность тлеющего разряда на время, достаточное для ионизации всего разрядного промежутка и равномерного распределения разряда по всей поверхности электродов, а плавная затяжка тока при подходе его к нулю в конце увеличивает время на деионизацию разрядного промежутка и тем самым способствует увеличению вентильной прочности прибора.

На рис.3 и 4 приведены временные диаграммы работы генератора и пусковая характеристика магнетрона. Для надежной длительной работы генератора предварительно производится тренировка $\sim 2 \cdot 10^4$ импульсов вновь изготовленных вентилях токами плотности ~ 8 а/см² при минимальном количестве обратных пробоев. Такая плотность тока позволяет исключить

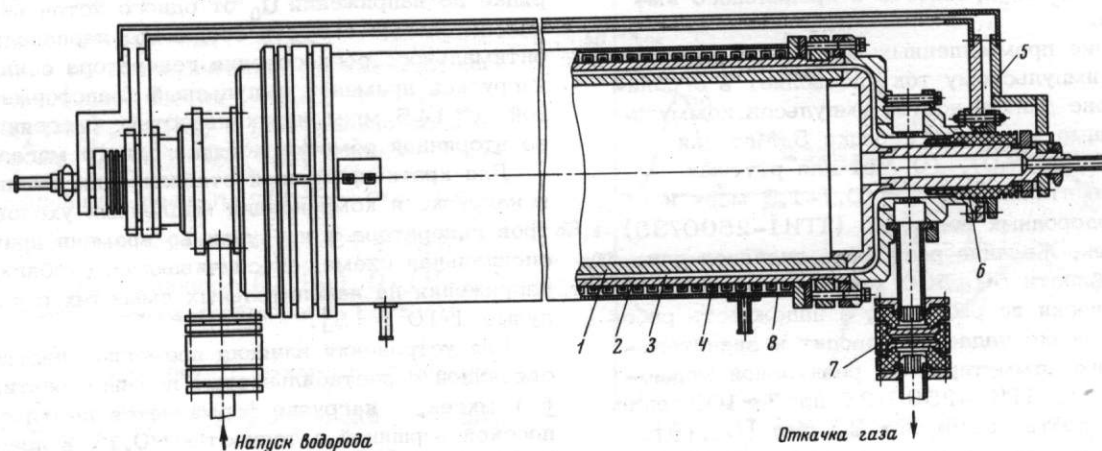


Рис. 2. Конструкция магнитоуправляемого вентиля

1 - анод; 2 - катод; 3 - разрядный промежуток; 4 - обмотка управления; 5 - токоподвод; 6 - изолятор; 7 - вакуумная развязка; 8 - кожух охлаждения

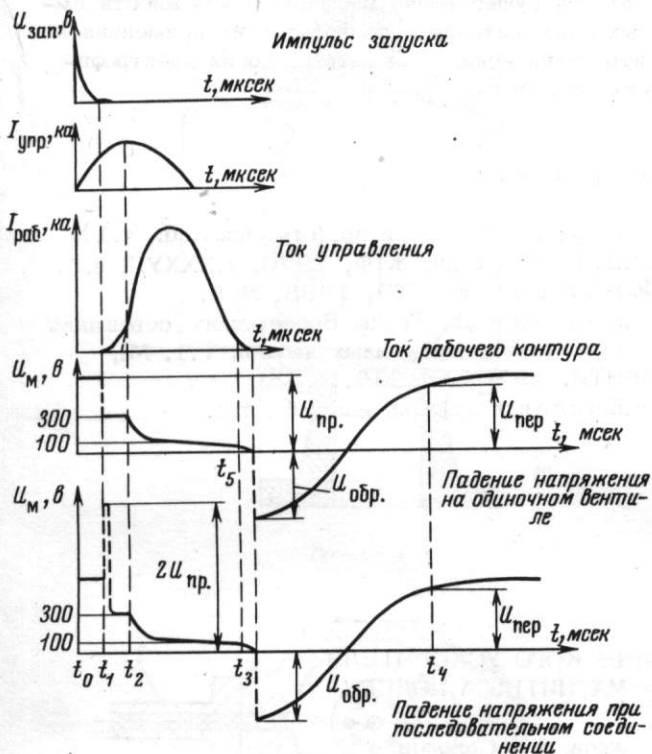


Рис. 3. Временные диаграммы работы генератора

t_0 - момент запуска генератора поджига; t_1 - момент зажигания вентиля; t_2 - момент перехода тлеющего разряда в дуговой; t_3 - момент подхода тока к нулю и возникновение обратного напряжения на вентиле; t_4 - момент окончания перезарядки и начала зарядки накопительной емкости; $t_1 - t_2$ - ступенька тлеющего разряда; $t_2 - t_3$ - дуговой разряд; $t_3 - t_4$ - длительность перезарядки; $t_3 - t_5$ - задержка дросселя

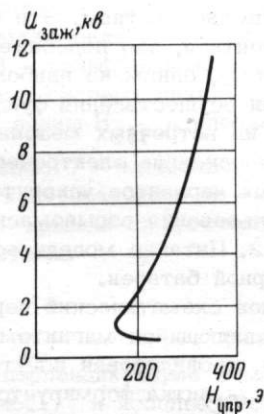


Рис. 4. Пусковая характеристика магнетрона для $(pd)_{H_2} = 2.10^{-2}$ тор.см ($(pd)_{H_2} = 2.10^{-2}$ тор.см)

разрывы тока и пинчевание дуги. При этом накладываются еще и определенные требования на длительность поля управления: 1) магнитное поле управления необходимо снять до момента окончания импульса рабочего тока, в противном случае магнетрон теря-

ет вентиляльные свойства; 2) снятие поля управления во время развития тлеющего разряда (управляемость прибором сохраняется) ведет к разрыву тока, если к этому времени не достигнута минимальная плотность тока ~ 4 а/см². Сначала тренировка ведется при бифилярной обмотке управления в воздушной среде, что способствует получению достаточно прочной пленки на аноде. При этом симметрия токоподводов позволяет прогонять разряд в ту или другую сторону вдоль электродов. Дальнейшая тренировка делается в среде водорода.

Характерными параметрами хорошей работы вентиля являются: 1) количество обратных пробоев не более 0,1%; 2) ступенька тлеющего разряда с падением напряжения в 300-350 в; 3) стабильность момента зажигания разряда ~ 1 мксек; 4) пусковая характеристика магнетронного типа; 5) стабильность вакуума.

В настоящее время проведены экспериментальные исследования и достигнута надежная работа генератора при длительности импульса $\sim 100-200$ мксек (реактивная мощность ~ 1 Гвт) на одном магнитоуправляемом вентиле с максимальными импульсными параметрами: электрическая прочность ~ 20 кв; вентильная прочность не менее 10 кв, предельный импульсный ток 100 ка.

Применение двух магнитоуправляемых вентилях в рассмотренной выше схеме дало возможность полу-

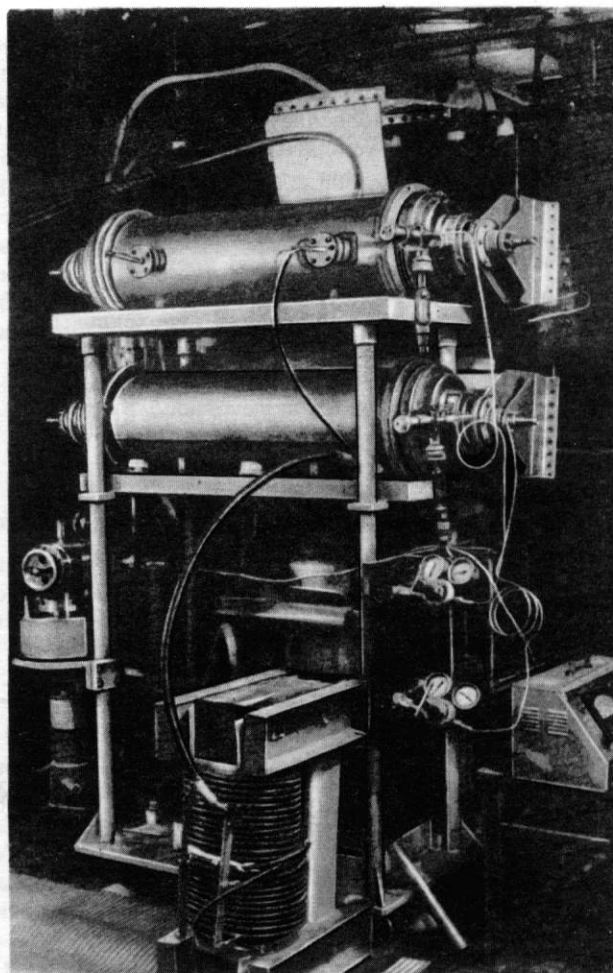


Рис. 5. Общий вид блока магнетронов

чить импульсный генератор на реактивную мощность $\sim 1,5$ Гвт (напряжение на вентилях ± 9 кв, ток 80 ка).

Стандартные схемные решения коммутации магнетронов (параллельное соединение) позволяют создать надежно работающий генератор на реактивную мощность порядка 2 Гвт. Общий вид блока последовательно соединенных магнетронов представлен на рис.5.

Отличительная особенность вентиля с холодным катодом состоит в том, что его вентиляльные свойства не зависят от полярности напряжения на электродах. Это позволяет создать генератор на цуг импульсов различной полярности, используя лишь один прибор. Перспективным является также дальнейшее увеличение параметров вентилях такого типа за счет увеличения рабочей площади электродов.

Дальнейшая разработка и усовершенствование мощных вентилях существенно расширят возможности импульсных схем питания и позволят с их применением повысить технические параметры многих электрофизических устройств.

Литература

1. Т.А.Всеволожская и др. (см. наст.сб., т.1).
2. Д.Л.Данилов и др. ЖТФ, 1970, т.ХХХУП, в.5.
3. Б.Ф.Баянов и др. ПТЭ, 1968, № 5.
4. Б.Ф.Баянов и др. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Т.1. М., ВИНТИ, 1970, стр.283.
5. А.Ф.Байдак и др. См. наст.сб., т.1.

51. ЭЛЕКТРОННАЯ МОДЕЛЬ ЦИКЛИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ СО СВЕРХСИЛЬНЫМ ВЕДУЩИМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

А.В.Грызлов, В.С.Панасюк, В.М.Рыжков, А.А.Соколов,
Я.М.Спектор, В.М.Степанов

(Всесоюзный научно-исследовательский институт
оптико-физических измерений)

Применение сверхсильных магнитных полей порядка 1 Мгс и более позволяет свести к минимуму размеры циклического ускорителя при заданной конечной энергии частиц. При этом компактность и малая стоимость ускорителя достигаются за счет его одноразового действия, поскольку давления, соответствующие полям, значительно превосходят предел прочности металлов. В этих условиях прибегают к взрывной технике получения сверхсильных магнитных полей [1 - 3]. Известны два способа получения полей 1 Мгс с помощью взрыва [2]: сжатие магнитного потока, заключенного в проводящую оболочку (генераторы типа МК-1), и возбуждение одновитковых магнитных систем взрывомагнитными генераторами тока (генераторы типа МК-2). Первый способ целесообразно применять главным образом для бетатронного ускорения частиц, второй - для высокочастотного.

Если в обычных импульсных циклических ускорителях энергоемкость магнита определяет тип магнитной системы и ограничивает в конечном счете интенсивность и энергию ускорителя, то энергетические возможности взрывомагнитных генераторов позволяют использовать хотя и более энергоемкие, но конструктивно простейшие типы магнитных систем при размерах апертуры, сравнимых с радиусом кривизны орбиты частиц. Это может значительно упростить конструкцию ускорителя и увеличить его интенсивность, что чрезвычайно важно для ускорителей однократного действия. Очевидно, что в подобных ускорителях системы инжекции, захвата, ускорения и выпуска частиц должны быть предельно просты и адекватны магнитной системе ускорителя по размерам и стоимости.

Из возможных областей применения взрывомагнитных ускорителей прежде всего следует отметить встречные пучки. Как известно, при прочих равных условиях с ростом магнитного поля квадратично увеличивается плотность пучков и отношение числа полезных взаимодействий к фону. Помимо этого, характерный для взрывомагнитных ускорителей весьма быстрый прирост энергии дает возможность ускорять короткоживущие частицы. Эти обстоятельства позволяют надеяться, что подобные ускорители являются, по-видимому, одним из наиболее подходящих устройств для осуществления фундаментальных экспериментов на встречных мезонных пучках.

Ниже приводится описание электронной модели одного из возможных вариантов ускорителя, рассчитанного на использование взрывомагнитного генератора типа МК-2. Питание модели осуществляется от конденсаторной батареи.

На рис.1 приведен схематический чертеж модели. Массивный виток, являющийся магнитом и вакуумной камерой ускорителя, профилирован изнутри так, что во внутренней полости витка формируется магнитное поле, аналогичное по форме полю обычной адиабатической ловушки с пробочным коэффициентом около двух. Виток подключен через коммутирующий разрядник к конденсаторной батарее с помощью шин. Одновременно полость витка используется как объемный резонатор для получения высокочастотного ускоряющего электрического поля. С этой целью на торцы витка через изолирующие прокладки накладываются тонкие металлические пластинки, замыкающие торцы по высокой частоте. С помощью петли связи в объемном резонаторе возбуждаются высокочастотные колебания типа H_{111} , электрическое

52. ПРИМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТОВ С ПОЛЯМИ 120 кЭ
В БЛОКЕ КОНВЕРСИИ НАКОПИТЕЛЯ ВЭПП-3

Т.А.Всеволожская, Т.Е.Вечеславова, Л.Л.Данилов, В.Н.Карасюк,
Г.И. Сильвестров, Э.М. Трахтенберг

(Институт ядерной физики СО АН СССР)

В настоящее время развивается интерес к созданию надежно работающих устройств с импульсными магнитными полями 100–200 кэ. Однако в экспериментальной ядерной физике распространение получили лишь многовитковые системы соленоидального типа с однородным магнитным полем [1,2]. Эти устройства обладают удобной геометрией для восприятия значительных динамических нагрузок, а большое количество витков значительно облегчает их питание. Кроме того, следует заметить, что указанный диапазон полей не нашел еще применения в оптике транспортировки заряженных частиц и ускорительной технике.

В работе рассматриваются созданные в ИЯФ СО АН применительно к оптике конверсии позитронов на установке ВЭПП-3 [3] одновитковые импульсные поворотно-фокусирующие магниты с полем 120 кэ и заданным постоянным градиентом.

Конструктивная разработка таких систем должна удовлетворять ряду требований, касающихся прочности, жесткости и выбора материала токонесущих шин: высокая теплопроводность и теплоемкость, приемлемые прочностные характеристики и долговечность. Существенными являются также проблемы создания контактов на большие плотности токов и съема тепла, выделяющегося в проводниках. Кроме того, работа магнитов связана с большой частотой циклов и минимальной долговечностью порядка миллиона циклов.

Параметры импульсных магнитов, один из которых фокусирует электроны на конвертер M_1 , а другой собирает конвертированные позитроны M_2 , приведены ниже:

	M_1	M_2
Равновесный радиус, см.	12,5	7,5
Угол поворота, град	63	45
Показатель спада поля n	0,5	0,5
Фокусное расстояние, см	25,4	20,6
Энергия частиц, Мэв	450	225
Высота шин, см	5	8
Радиальная апертура, см	1,6	2
Максимальное поле, кэ	120	120
Максимальный ток, ка	860	1000
Индуктивность, мкГн	0,05	0,03
Длительность, мксек	120	100
Энергия магнитного поля, кдж.	18,5	15
Частота повторения импульсов, Гц	5	5
Средняя мощность тепловых потерь, квт	18,5	15
Тепловой напор, Вт/см ²	80	85

Конструкция электронного магнита представлена на рис.1. В апертуре магнита наружная и внутренняя токонесущие шины профилированы в виде эллипсоидов вращения. На торцах профилирование плавно переходит в высокие плоские токоподводы с развитой контакт-

ной поверхностью. Для формирования краевого поля токоподводящая и коммутирующая шины с прямоугольным входным и выходным отверстиями для протускания частиц имеют специальный профиль, повторяющий геометрию токонесущих шин на торцах. Шины за исключением контактных мест покрыты изолятором из эпостека. Эксперименты по исследованию контактов показали бесперспективность создания контактов на плотность тока полного рабочего поля – порядка 100 ка на 1 см высоты шины: из-за больших тепловых и динамических нагрузок наблюдается искрение контактов после нескольких тысяч импульсов.

В рассматриваемой конструкции контактные поверхности сильно развиты, что позволяет уменьшить

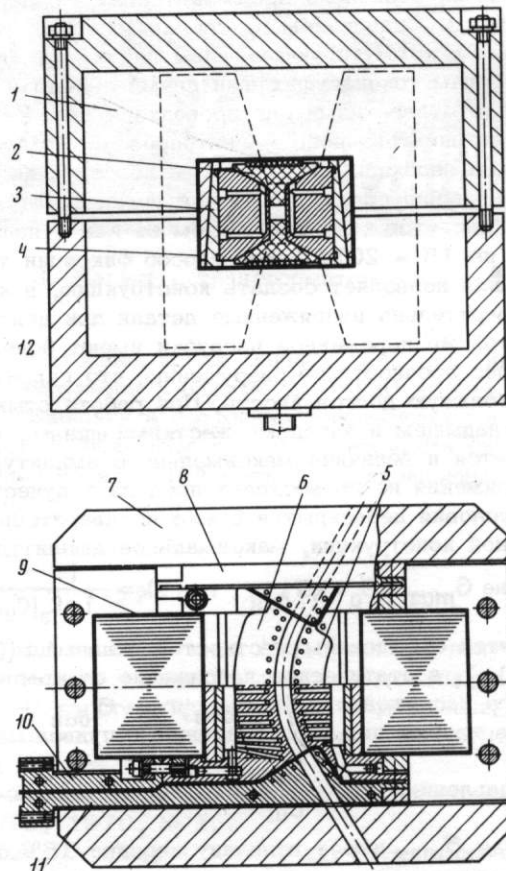


Рис. 1. Импульсный магнит на поле 120 кэ

1 – силовой бандаж из электротехнической стали;
2 – эпостековые базирующие и одновременно силовые вкладыши; 3 – силовые клинья; 4 – изолятор; 5 – внутренняя профилированная шина; 6 – наружная профилированная шина; 7 – силовая крышка; 8 – коммутирующая шина; 9 – изоляция магнитопровода; 10 – токоподвод; 11 – токоподводящая шина; 12 – каналы охлаждения

плотность тока в 3-4 раза. При этом мы исходим из того, что сопротивление контактного перехода не зависит от площади перекрытия контактирующих электродов и определяется полной силой, создаваемой болтовыми соединениями. Ширину контактного стыка не следует брать больше трех скин-слоев, а высота определяется размещением необходимого количества болтовых соединений. Кроме того, где это возможно, нужно отводить тепло, выделяющееся в контактном сопротивлении непосредственно в месте контакта, что позволяет надежно работать при плотностях тока порядка 30 ка на 1 см длины.

В качестве материала шин используется хромистая бронза БрХ-0,5, имеющая после специальной термообработки (закалка, облагораживание) твердость по Бринелю порядка 120 единиц.

Радиальная фиксация шин обеспечивается эпоксидными вкладышами, изготовленными из стеклохолста, пропитанного эпоксидной смолой методом монолит. При этом напряжение волокон выбирается перпендикулярным действующей силе.

Шины, собранные вместе с вкладышами, вставляются в бандаж, представляющий собой шихтованный магнитопровод в жестком корпусе, и стягиваются с помощью двух пар стальных закаленных клиньев, изолированных от магнитопровода. Усилие, развиваемое клиньями, несколько превышает силу, создаваемую магнитным давлением. С торцов магнита токоподводящая и коммутирующая шины плотно прижимаются к торцам токонесущих шин двумя силовыми крышками с отверстиями для проводки пучка. Использование шихтованного магнитопровода, помимо обеспечения необходимой жесткости конструкции за счет ограничения обратного потока, увеличивает эффективность магнитов (мы определяем ее как отношение H_{max}/I_{max} на 15 - 20%). Такой способ фиксации токонесущих шин позволяет создать конструкцию, в которой предварительно напряженные детали при действии одной и той же переменной нагрузки имеют более высокий запас прочности по разрушению, что гарантирует их большую долговечность. При работе стык между вкладышем и заводом жесткими шинами не раскрывается и величина максимального амплитудного напряжения не превосходит предела текучести. Так, из условия нераскрытия стыка предварительно напряженной конструкции, максимальное амплитудное напряжение $\sigma_{max} = \sigma_0 + k\sigma_{дин}$, где $k = \frac{1}{1 + C_3/C_{ш}}$

определяется отношением жесткостей вкладыша (C_3) и шин ($C_{ш}$), а статическое напряжение от предварительного нагружения $\sigma_0 \approx \sigma_{дин}$, где $\sigma_{дин}$ - амплитуда напряжения при действии импульса магнитного давления. При $\frac{C_3}{C_{ш}} \approx 6$ переменная со-

ставляющая σ_{max} имеет величину порядка 15% от σ_0 , что существенно повышает долговечность работы материала деталей. Однако в апертуре магнита материал работает на полное динамическое напряжение. Известно [4], что для расчета динамических напряжений при импульсной нагрузке достаточно знать

коэффициент динамичности $k = 2 \sin \frac{\pi}{2} \frac{\tau_u}{\tau_0}$. Это по-

зволяет при известном значении полупериода τ_0 собственных колебаний системы подобрать такую длительность импульса давления магнитного поля, при

которой динамические напряжения будут меньше статических. Так, при $\tau_0 = 400$ мксек, $\tau_u = 100$ мксек в области апертуры $\sigma_{дин} \approx 0,75 \sigma_0$.

Характерным для одновитковых систем является то, что потеря энергии на активное сопротивление

проводников определяется как $W_R/W_H \approx 2,8 \cdot 10^{-4} \frac{\sqrt{\rho \tau}}{\Delta R}$, что для БрХ-0,5 ($\rho = 2 \cdot 10^{-6}$ ом.см) и $\tau_u = \approx 100$ мксек и $\Delta R = 2$ см составляет $\sim 20\%$.

В данной конструкции принята специальная "пористая" система охлаждения: вода прогоняется через систему каналов охлаждения таким образом, что тепло снимается практически в том месте, где выделяется основная мощность. Это сводит к минимуму перепад температуры по металлу. При скиновых процессах нагрев за импульс $\Delta T = 4,8 \cdot 10^{-8} I^2 \frac{1}{C_T}$ не зависит от длительности импульсов и составляет $\sim 30^\circ C$. Установившаяся температура $\sim 100^\circ C$ при расходе воды ~ 100 л/мин.

На формирование поля в апертуре безжелезных систем (распределение n по радиусу и по высоте) существенно сказывается относительное изменение радиуса $\frac{\Delta R}{R}$ и отношение высоты шин к радиальной

апертуре $\frac{z}{\Delta R}$. Кроме того, высота шин определяет еще и эффективность магнита.

Образующие токовых поверхностей шин, формирующих поле в апертуре магнита, задаем в виде эллипсов

$\frac{x^2}{\xi^2} + \frac{y^2}{\xi^2 - 1} = \alpha^2$, где α определяется равновесным радиусом и показателем "n", как $n = \frac{R_0^2}{R_0^2 + \alpha^2}$. Зна-

чения ξ для каждой из поверхностей находятся из условия $\rho^2_{z=0} = \alpha^2 (\xi^2 - 1)$.

При достаточно высоких шинах составляющие поля

в апертуре имеют вид $H_z = \text{const} \frac{ch v}{ch^2 v - \sin^2 u}$, $H_p = -\text{const} \frac{tg u \cdot sh v}{ch^2 v - \sin^2 u}$, где $\sin u = \frac{S_1 - S_2}{2\alpha}$, $S_1 = \sqrt{(\alpha + z)^2 + \rho^2}$, $S_2 = \sqrt{(z - \alpha)^2 + \rho^2}$, так что при $z=0$ H_z зависит от радиуса как $H_z = \frac{\text{const}}{\sqrt{\rho^2 + \alpha^2}}$

и нелинейность на краю апертуры $A_v = \pm 1$ см при $R_0 = 7,5$ см дает вклад в поле $\sim 10^{-3} H_z(R_0)$.

Ограничение шин по высоте производится поверхностью с образующей в виде гиперболы $\frac{x^2}{\eta^2} - \frac{y^2}{1 - \eta^2} = \alpha^2$, где значение η определяется высотой шин. По-

верхность с такой образующей является эквипотенциальной для поля в апертуре, благодаря чему возмущение поля за счет ограничения высоты шин оказывается минимальным при заданной их высоте. При выбранной высоте шин возмущение показателя спада поля на краю апертуры $A_x = \pm 1$ см составляет (по расчетам) 10%.

Существенным для оптических свойств магнита является вклад краевых полей входного и выходного отверстий (в торцевых коммутирующей и токоподводящей шинах, ширина которых сравнима с длиной магнита) в интеграл поля по длине магнита. Их влияние изучалось на модели и было обнаружено, что

принятая коммутация шин с применением торцевых экранов обеспечивает достаточно хорошее формирование краевых полей, так что интеграл от поля по длине магнита линейен по R и по z с точностью $\sim 3\%$.

Таким образом, можно ожидать, что использование описанных магнитов для фокусировки частиц в блоке конверсии обеспечит собирание позитронов в расчетном фазовом объеме [3].

Питание магнитов осуществляется от импульсного генератора с реактивной мощностью 1,5 Гвт на магнитоуправляемых вентилях [5]. Для согласования нагрузки с генератором используется импульсный трансформатор кабельного типа с коэффициентом трансформации 10 и малой индуктивностью рассеяния порядка 4 нгн (см.рис.2).

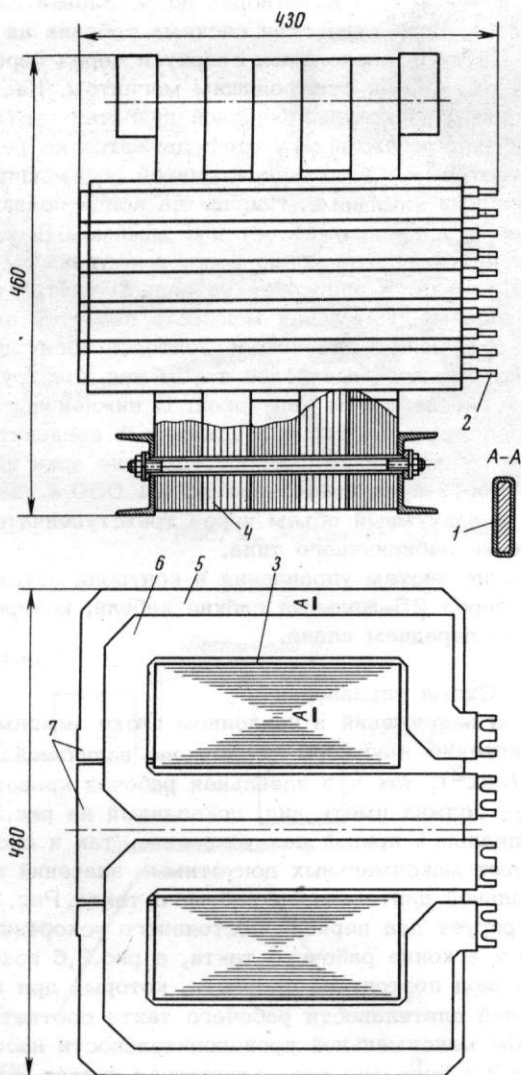


Рис. 2. Импульсный трансформатор

1 - изоляция первичной обмотки; 2 - вводы первичной обмотки; 3 - изоляция магнитопровода; 4 - сборный магнитопровод; 5 - виток вторичной обмотки; 6 - плоский виток первичной обмотки; 7 - малоиндуктивный вывод вторичной обмотки

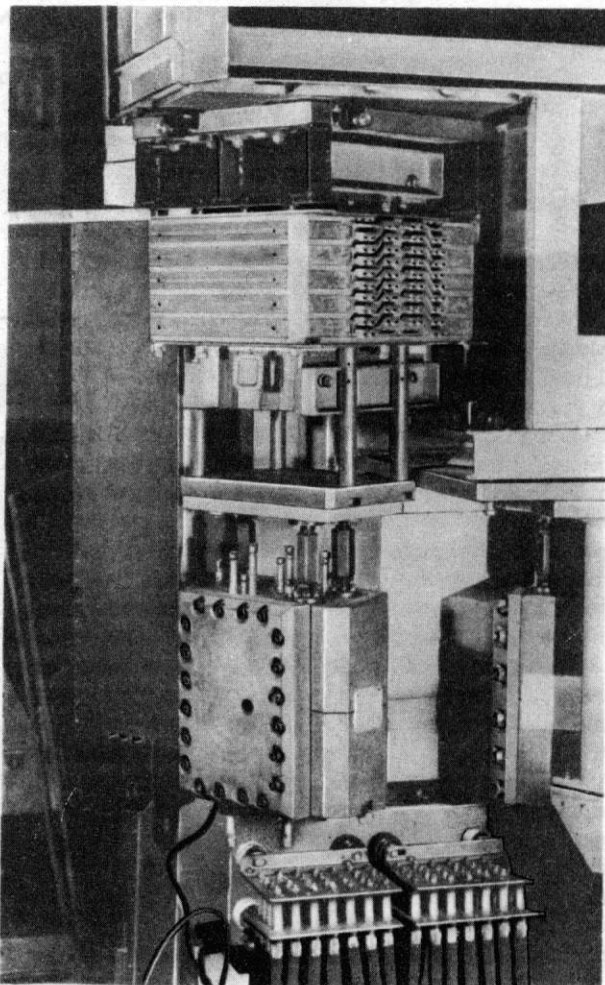


Рис. 3. Магнит с трансформатором на комплексе

В настоящее время магниты испытаны на $2,5 \cdot 10^5$ импульсов в режиме 100-120 кэ. Существенных изменений в состоянии токонесущих шин и эпоксидного вкладыша не наблюдается. На рис.3 представлен позитронный магнит, установленный на комплексе для монтажа.

Литература

1. В.В.Ахманов и др. Установка для получения импульсных магнитных полей напряженностью до 150 кэрстед, используемая в физических экспериментах на синхроциклотроне ЛЯП ОИЯИ. ПТЭ, 1965, № 4.
2. В.К.Макарьяни. Импульсный магнит на 70 кэ. ПТЭ, 1970, № 1.
3. Т.А.Всеволожская и др. Электронно-оптический канал ВЭПП-3. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, М., ВИНТИ, 1970.
4. Я.Г.Пановко. Основы прикладной теории упругих колебаний. М., 1957.
5. Л.Л.Данилов. См. наст.сб., т.1.

торцевой части обмотки, где расположены круговые и переходные участки витков.

Рассмотренную в данной работе методику расчета предполагается использовать в первую очередь для определения оптимальной конструкции торцевых частей обмотки, обеспечивающих такую форму поля на краях магнита, при которой возмущение движения частиц за счет краевых эффектов было бы минимальным.

Следует также отметить, что методика точного расчета поля дает возможность критически анализировать результаты измерений магнитного поля изготовленных сверхпроводящих магнитов. По степени отличия результатов измерений от расчетных данных можно судить не только о точности изготовления магнита, но также и о величине возможных "паразитных" токов в сверхпроводящих жилах кабеля обмотки магнита, обусловленных намагниченностью сверхпроводника II рода.

Литература

1. P.F. Smith, J.D. Lewin. Nucl. Instr. and Methods, 1967, 52, N 2, p.298.
2. А.А. Васильев, А.И. Дзергач, Р.А. Мешеров, Е.С. Миронов, А.Г. Зельдович. УП Международная конференция по ускорителям. Ереван, 27 августа - 9 сентября, 1969.
3. R.A. Beth. Proc. Second Internat. Conf. on Magnet Technol. Oxford, 1967, p. 135.
4. Р.А. Мешеров, Е.С. Миронов. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М., 9-16 октября, 1968. Т. 1. ВИНТИ, 1970, стр. 605.
5. J.P. Blewett. Proc. 1968 Summer Study on Superconducting Devices and Accelerators. Part III, p. 1042.
6. A.A. Halacsy, G. Clark, J. Dunks. Proc. Second Internat. Conf. on Magnet Technol. Oxford, 1967, p.61.

60. РАСЧЕТЫ БЕЗЖЕЛЕЗНЫХ МАГНИТОВ С "ТОЛСТЫМИ" ОБМОТКАМИ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

В.Г. Давидовский

(Институт ядерной физики СО АН СССР)

В связи с развитием технологии сверхпроводников и переходом к ускорителям на сверхвысокие энергии все шире будут применяться безжелезные магниты. При их конструировании полезно знать идеальные формы обмоток, формирующих заданное стационарное плоское поле, и некоторые характеристики таких систем. Тонкие обмотки рассматривались в [1], однако практически интересны "толстые" обмотки.

Рассмотрим формирование плоскости поля $H_0(r, \varphi)$ с потенциалом

$$A(r, \varphi) = - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_n r^n}{n} \left(\frac{r}{r_0} \right)^n \cos(n\varphi + \varphi_n) \quad (1)$$

в круге, который плотно окружен длинными токонесущими проводниками, перпендикулярными плоскости круга (формирующая обмотка). Величина плотности тока j постоянна по всему сечению обмотки, полный ток равен нулю. Формирующая обмотка окружена экраном (железным ($\mu = \infty$) или токовым - экранирующая обмотка), внутренняя граница которого есть окружность, концентрическая с границей области формирования (рис. 1). Везде ниже верхний знак относится к случаю железного экрана, нижний - токового. Потенциал поля между формирующей и экранирующей обмотками запишем в виде:

$$A_{\text{пром}}(r, \varphi) = - \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{d_n}{n} \left(\frac{r_0^{n+1}}{r^n} \right) + \frac{c_n}{n} \left(\frac{r^n}{r_3^{n-1}} \right) \right\} \cos(n\varphi + \varphi_n). \quad (2)$$

В случае токового экрана считаем, что поля вне системы нет.

"Тонкие обмотки". Если "толщина" обмотки $\Delta(\varphi) = r(\varphi) - r_0 \ll r_0$, то обмотку можно считать "тонкой" и рассматривать как токовый слой. Получаем

$$c_n = \pm \frac{(r_0/r_3)^{n+1}}{1 \pm (r_0/r_3)^{2n}} r_0^{n-1} b_n, \quad d_n = \frac{1}{1 \pm (r_0/r_3)^{2n}} r_0^{n-1} b_n,$$

уравнение "тонкой" формирующей обмотки

$$\frac{j(\varphi)}{j} \frac{\Delta(\alpha, \varphi)}{r_0} = \frac{1}{\frac{2\pi}{c} j r_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{1 \pm \left(\frac{r_0}{r_3} \right)^{2n}} r_0^{n-1} b_n \times \cos(n\varphi + \varphi_n)$$

и, в случае токового экрана, уравнение "тонкой" экранирующей обмотки

$$\frac{j_3(\varphi)}{j} \frac{\Delta_3(\alpha, \varphi)}{r_0} = \frac{1}{\frac{2\pi}{c} j r_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(r_0/r_3)^{n+1}}{1 - (r_0/r_3)^{2n}} \times r_0^{n-1} b_n \cos(n\varphi + \varphi_n),$$

где $j(\varphi)$ и $j_3(\varphi)$ - кусочнопостоянные знакопеременные функции $|j(\varphi)| = j$ и $|j_3(\varphi)| = j_3$. Мы ввели параметр толщины, который удобно определить как $\alpha = b_p r_0^{p-1} / \left(\frac{2\pi}{c} j r_0 \right)$, где b_p - коэффициент наиболее существенного мультиполя в разложении (1), характеризующий амплитуду формируемого поля при заданной его конфигурации. Приравнявая нулю правые части (3) и (4), определяем положение

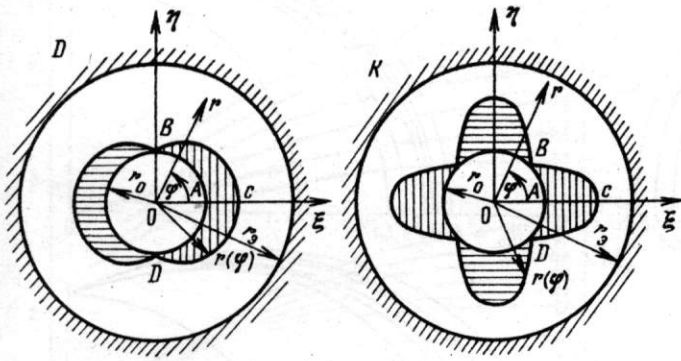


Рис. 1. Качественный вид дипольного и квадрупольного магнитов с железными экранами

Части обмоток с взаимно противоположными токами покрыты взаимно перпендикулярной штриховкой

точек на окружности r_0 , в которых "толщина" $\Delta(\alpha, \varphi)$ обмотки обращается в нуль, а направление тока меняется на обратное. Будем называть эти точки узловыми. Из (3) и (4) следует: 1) наружные границы формирующих обмоток образуют однопараметрическое семейство $r(\alpha, \varphi)/r_0 = 1 + \Delta(\alpha, \varphi)/r_0$, имеющее узловые точки, лежащие на границе области формирования (аналогично для экранирующих обмоток); 2) положение узловых точек $\varphi_{уз}$ на окружности r_0 (для токового экрана - на окружности r_3) определяется исключительно конфигурацией поля и не зависит от его амплитуды. Узловые точки разбивают обмотки на отдельные элементарные части, направления токов в двух соседних частях взаимно обратны. Положение узловых точек чистых мультиполей очевидно из симметрии.

В случае "тонкой" обмотки толщина $\Delta(\alpha, \varphi)$ пропорциональна α .

"Толстые" обмотки. Выводы 1) и 2) справедливы для обмоток любой толщины. Поэтому, определив положение узловых точек из уравнения "тонких" обмоток (3) и (4), знаем разбиение обмотки произвольной толщины на элементарные части. Легко показать, что потенциал поля внутри любой такой части дается выражением

$$A_M(r, \varphi) = A_0(r, \varphi) - \frac{\pi j}{c} \int [r^2 - r_0^2 - 2r_0^2 \ln(r/r_0)], \quad (5)$$

где $A_0(r, \varphi)$ - потенциал формируемого в круге поля. При переходе к соседней элементарной части $j \rightarrow -j$. При токовой экранировке потенциал поля внутри экранирующей обмотки аналогично выражается через потенциал промежуточной области (2):

$$A_{ЭМ}(r, \varphi) = A_{пром}(r, \varphi) + \frac{\pi j}{c} \int [r^2 - r_3^2 - 2r_3^2 \ln(r/r_3)]. \quad (6)$$

Потенциалы (5) и (6) автоматически удовлетворяют граничным условиям соответственно на окружностях r_0 и r_3 . В случае железного экрана граничное условие на железе дает $c_n = d_n (r_0/r_3)^{n+1}$.

Используя (5) и (2), запишем граничные условия на наружной границе формирующей обмотки $r(\varphi)$

$$H_{0r}(r(\varphi), \varphi) = \sum_{n=1}^{\infty} d_n \left\{ (r_0/r(\varphi))^{n+1} + (r_0/r_3)^{2n} \times (r(\varphi)/r_0)^{n+1} \right\} \sin(n\varphi + \varphi_n), \quad (7)$$

$$H_{0\varphi}(r(\varphi), \varphi) + \frac{2\pi}{c} j(\varphi)(r(\varphi) - r_0^2/r(\varphi)) = - \sum_{n=1}^{\infty} d_n \left\{ -(r_0/r(\varphi))^{n+1} + (r_0/r_3)^{2n} (r(\varphi)/r_0)^{n-1} \right\} \times \cos(n\varphi + \varphi_n).$$

Это - уравнения "толстой" формирующей обмотки с железным экраном, они определяют $r(\varphi)$ и совокупность коэффициентов d_n .

Аналогично в случае токового экрана, записывая граничные условия на наружной границе формирующей обмотки и условия исчезновения поля на наружной границе экранирующей обмотки, получаем систему уравнений "толстых" формирующей и экранирующей обмоток. Эта система определяет $r(\varphi)$, $r_3(\varphi)$ и совокупность коэффициентов c_n, d_n .

Полученные уравнения "толстых" обмоток удобно решать численно следующим итерационным процессом. Пусть при решении системы (7) на каком-то цикле итерации получена совокупность d_n и последовательность точек $r(\varphi_p)$ на искомой границе формирующей обмотки. Очередной цикл итерации состоит в определении новой совокупности d_n , наилучшим образом в среднеквадратичном смысле удовлетворяющей первому уравнению системы (7) на последовательности точек $r(\varphi_p)$. Используя эту новую совокупность d_n , из второго уравнения (7) определяем уточненную последовательность точек $r(\varphi_p)$. Процесс быстро сходится. Рис. 2-6 иллюстрируют некоторые из полученных результатов [2].

Силовые линии магнитного поля имеют центры, лежащие внутри элементарных частей обмотки. Положение центров качественно характеризует "полутолщину" обмотки и может быть элементарно определено из (5), так как в центре поле равно нулю. Центры квадрупольной обмотки находятся в точках $r_u = r_0/\sqrt{1-b}$, где $b = \nabla H / (\frac{2\pi}{c} j)$. Следовательно, $\nabla H \leq \frac{2\pi}{c} j$, причем равенство достигается в пределе бесконечно толстой обмотки.

Эллиптическая область. Определение форм обмотки формирующих заданное поле с потенциалом $A_0(r, \varphi)$ (1) в эллиптической области с полуосями (a, b) при наличии экрана (железного или токового), внутренняя граница которого есть софокусный эллипс с полуосями (A, B), можно провести совершенно аналогично случаю круговой области.

Положение узловых точек формирующей обмотки определяется из уравнения "тонкой" обмотки ($a > b$):

$$-\frac{j(\eta)}{j} \Delta(\eta) = \frac{1}{\frac{2\pi}{c} j \frac{a+b}{2}} \sum_{n=1}^{\infty} b_n \frac{a+b}{2} \frac{1}{a^2 \sin^2 \eta + b^2 \cos^2 \eta} \times \frac{\delta \varphi_n}{2^n n},$$

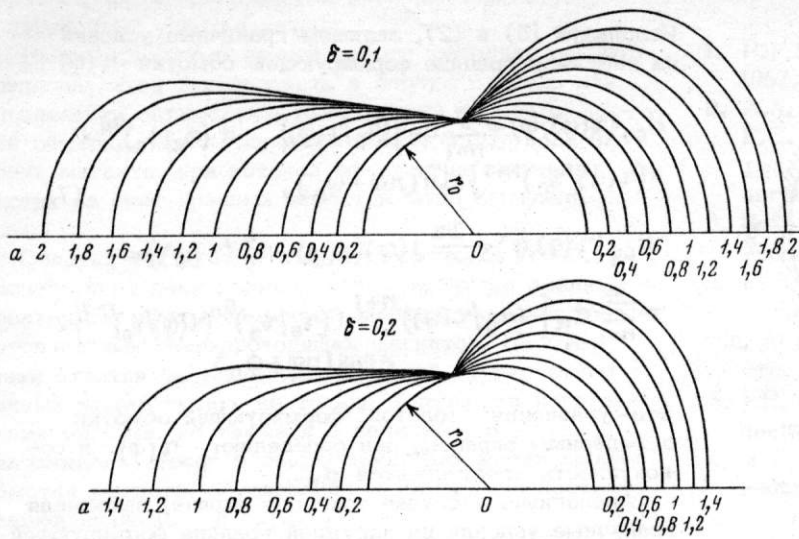


Рис. 2. Формы неэкранированных обмоток, формирующих суперпозицию дипольного и квадрупольного полей с горизонтальной плоскостью симметрии

$$\delta = (\nu_0 \nabla H) / H_0, \quad \alpha = H_0 / \left(-\frac{2\pi}{c} j \nu_0 \right)$$

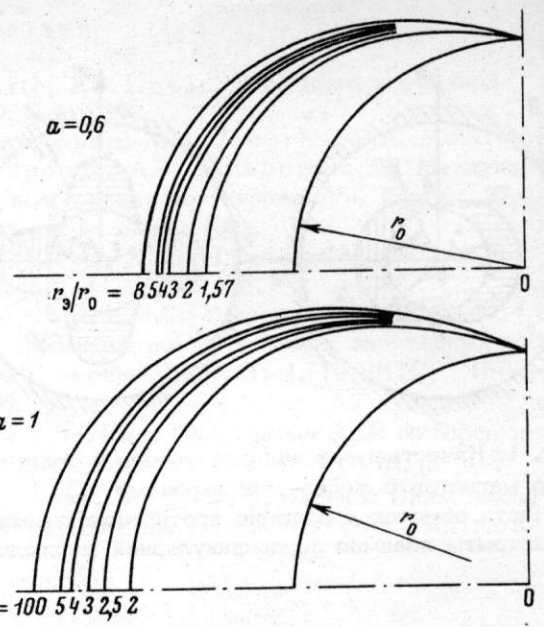


Рис. 3. Формы дипольных обмоток с железным экраном. Около каждой кривой указано соответствующее положение экрана $\alpha = H_0 / \left(\frac{2\pi}{c} j \nu_0 \right)$

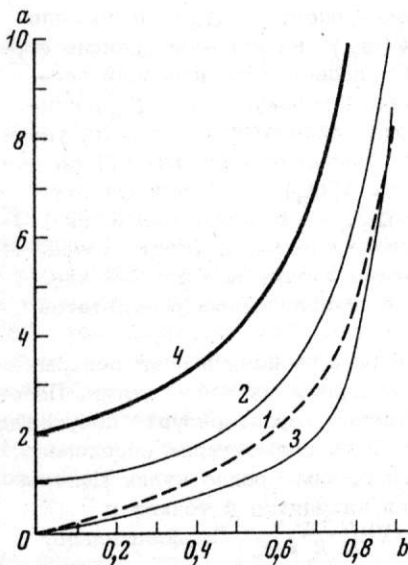


Рис. 4. Неэкранированный квадрупольный магнит

Площадь одного "уха" обмотки S/ν_0^2 (1), энергия магнитного поля в металле обмотки $W_{мет}/W_0$ (2), вне магнита $W_{нар}/W_0$ (3) и полная энергия $W_{полн}/W_0$ как функции $\delta = \nabla H / \left(\frac{2\pi}{c} j \right)$ ($W_{полн} = W_0 + W_{мет} + W_{нар}$, $W_0 = (\nu_0 \nabla H)^2 \nu_0^2 / 16$ — энергия поля в области формирования)

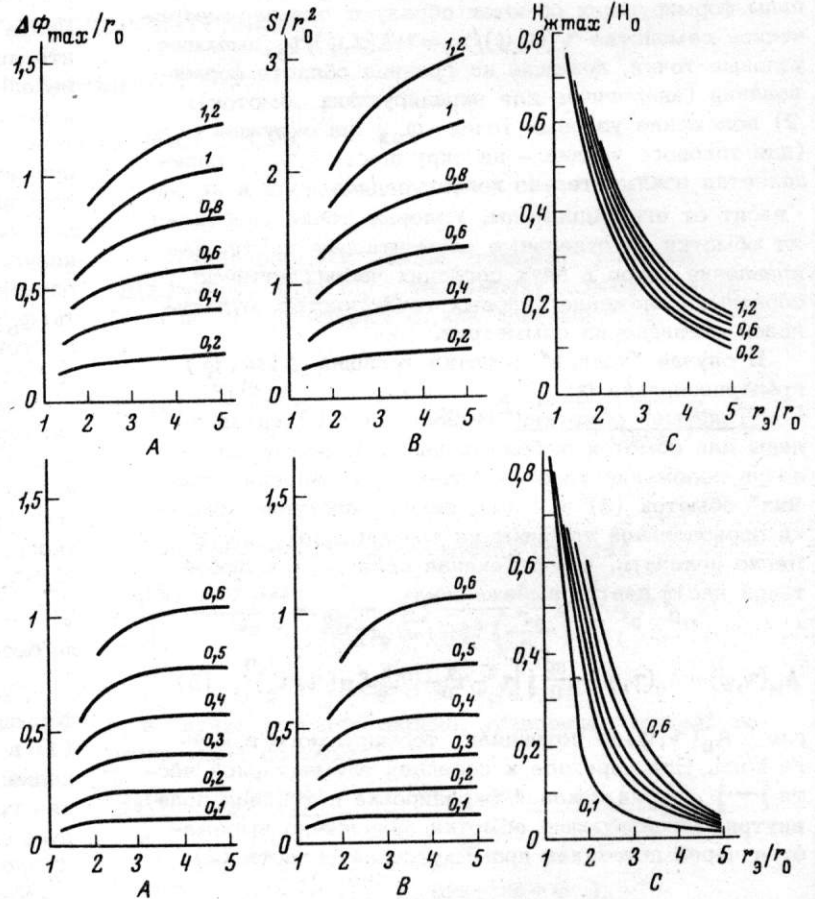
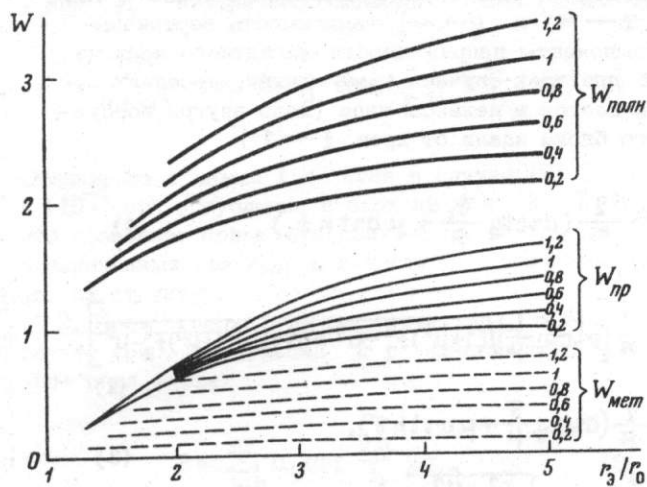


Рис. 5. Дипольный магнит с железным экраном (верхний ряд) и квадрупольный магнит с железным экраном (нижний ряд)

A — максимальная толщина обмотки $\Delta\Phi_{max}/\nu_0$; B — площадь одного "уха" обмотки S/ν_0^2 ; C — максимальное поле на железе $H_{жmax}/H_0$ (в случае квадруполья $\nu_0 \nabla H$ обозначено H_0) — функция положения экрана r_3/r_0 . Около каждой кривой верхнего ряда указано значение параметра $\alpha = H_0 / \left(-\frac{2\pi}{c} j \nu_0 \right)$, около кривых нижнего ряда — значение параметра $\delta = \nabla H / \left(\frac{2\pi}{c} j \right)$



где

$$S_{\phi n} = \sum_{k=0}^{n/2} \binom{n}{k} (n-2k)(a+b)^{n-2k} (a^2-b^2)^k \times$$

$$\times \left(\frac{1 \mp \left(\frac{A-B}{A+B}\right)^{n-2k}}{1 \pm \left(\frac{a+b}{A+B}\right)^{2(n-2k)}} \cos \phi_n \cos(n-2k)\eta - \right.$$

$$\left. - \frac{1 \pm \left(\frac{A-B}{A+B}\right)^{n-2k}}{1 \pm \left(\frac{a+b}{A+B}\right)^{2(n-2k)}} \sin \phi_n \sin(n-2k)\eta \right).$$

Связь эллиптических (ξ, η) и декартовых координат (x, y) : $a = \sqrt{a^2 - b^2}$,

$$x = a \operatorname{ch}(\xi - \beta) \cos \eta, \quad y = a \operatorname{sh}(\xi - \beta) \sin \eta,$$

$$\beta = \ln \left(\frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{2} \right), \quad \xi_0 = \ln \left(\frac{a+b}{2} \right).$$

Рис. 6. Дополнительный магнит с железным экраном

Энергия поля в металле обмотки $W_{\text{мет}}$, в области между обмоткой и экраном $W_{\text{пр}}$ и полная энергия поля $W_{\text{полн}} = W_0 + W_{\text{мет}} + W_{\text{пр}}$ в единицах $W_0 (W_0 = H_0^2 r_0^2 / 8 -$ энергия формируемого в круге поля) как функции положения экрана. Около каждой кривой указано значение параметра $\alpha = H_0 / (-\frac{2\pi}{c} j r_0)$

Потенциал поля внутри частей формирующей обмотки:

$$A_M(\xi, \eta) = A_0(\xi, \eta) - \frac{2\pi}{c} j e^{2\beta} \left\{ \operatorname{ch} 2(\xi - \beta) - \right.$$

$$\left. - \operatorname{ch} 2(\xi_0 - \beta) + \cos(2\eta)(1 - \operatorname{ch} 2(\xi - \xi_0)) - \right.$$

$$\left. - 2(\xi - \xi_0) \operatorname{sh} 2(\xi_0 - \beta) \right\}.$$

Аналогичные соотношения легко записать и для экранирующей обмотки.

Рассматривая положение центров квадрупольной обмотки, получаем, что если оси поля повернуты на 45° относительно осей эллипса, то $\nabla H \approx \frac{2\pi}{c} j \times$
 $\times 2 / (1 + a/b)$, если же они направлены по осям эллипса, то $\nabla H \approx \frac{2\pi}{c} j \sqrt{1 - \left(\frac{a-b}{a+b}\right)^2}$, причем равенства достигаются в пределе бесконечно толстых обмоток.

Литература

1. R.A. Beth. IEEE Trans. Nucl. Sci., Ns-14, 386, 1967.
2. В.Г. Давидовский. Препринт № 40, ИЯФ СО АН СССР, 1970.

61. РАСЧЕТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В МАГНИТАХ С РАЗРЕЗАМИ

В.П. Пападичев

(Физический институт им. П.Н. Лебедева АН СССР)

Магниты с разрезами нашли широкое распространение в ускорительной технике. В качестве примеров можно указать магнитные системы синхротронов, включающие сектора и прямолинейные промежутки, секторные магниты изохронных циклотронов [1-4], кольцевых фазотронов, микротроны с разрезным магнитом и т.д. Подобные же системы применяют для спектрометров, анализаторов и сепараторов частиц, а также в трактах проводки и фокусировки пучков.

Во всех этих случаях существенную роль играет краевой эффект, т.е. форма поля около границы магнит-промежутка. Например, при узких секторах

такие характеристики, как "эффективная ширина" сектора и флаттер, сильно зависят от величины зазора магнита и расположения обмотки. В других случаях (накопительные кольца, тракты проводки) краевые эффекты изменяют эффективную длину магнитов и линз и могут быть причиной нелинейности поля и аберраций.

Однако применяемые методы расчета [5] используют довольно грубое приближение "резкого" края, т.е. краевой эффект не учитывают. Обычно это делают экспериментально, и создание поля сложной конфигурации связано с моделированием нескольких вариантов магнита, что требует боль-