

39. МАГНИТНАЯ СИСТЕМА НАКОПИТЕЛЯ ВЭПП-3

Г.И. Будкер, Н.А. Кузнецов, Б.В. Левичев, И.Я. Протопопов, А.Н. Скринский
(Институт ядерной физики СО АН СССР)

Накопитель ВЭПП-3 [1] представляет собой два полукольца со средним радиусом 8 метров раздвинутых на 12 метров (рис. 1). В каждом прямолинейном промежутке укладывается точно одна волна бетатронных колебаний, т.е. они имеют единичную матрицу перехода.

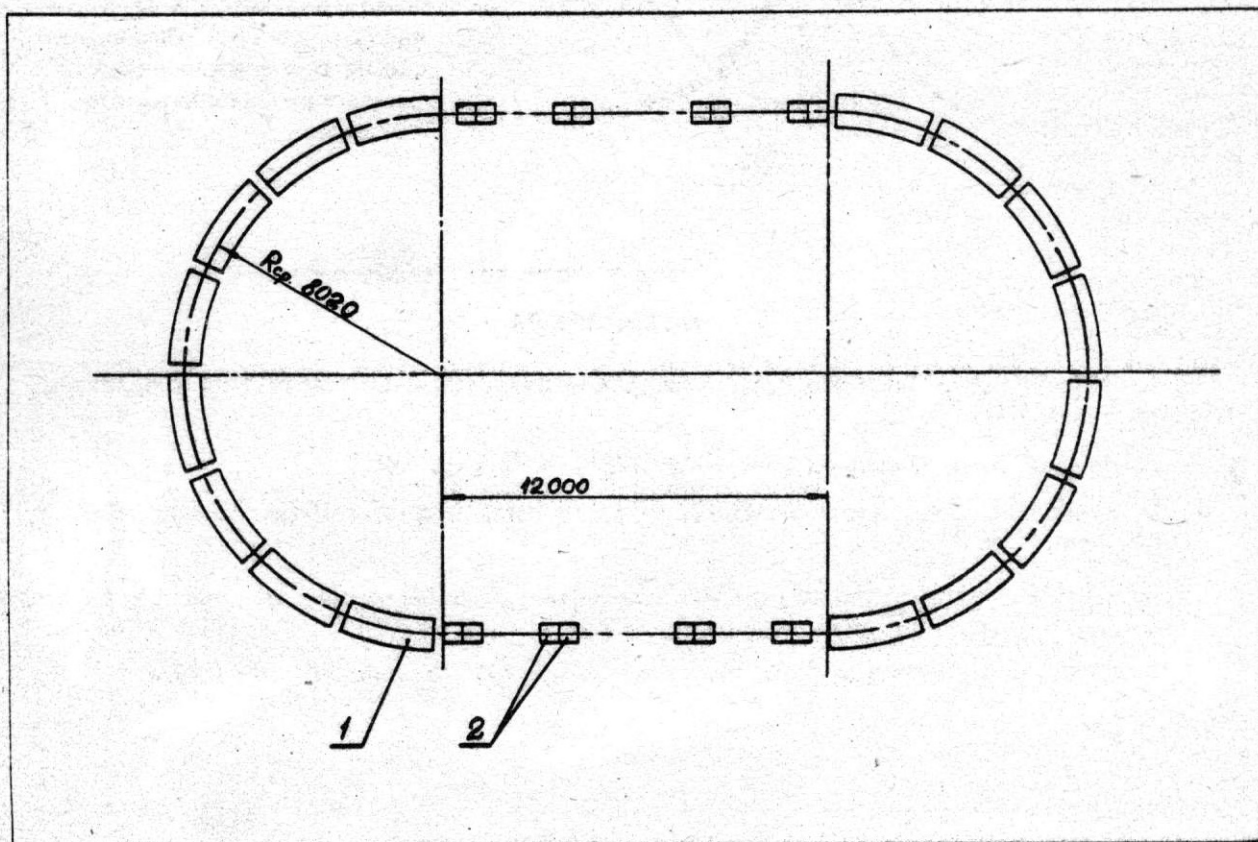


Рис. 1. Схема магнитной системы накопителя: 1 - магнитный блок (элемент периодичности), 2 - квадрупольные линзы

Круговая часть накопителя содержит 16 магнитных блоков, являющихся элементами периодичности накопителя. Длина каждого блока около трех метров при поперечном сечении $0,5 \times 0,3 \text{ м}^2$.

Прямолинейные участки состоят из четырех пар квадрупольных линз, разделенных участками без поля разной длины и предназначенных для размещения высокочастотной системы, регистрирующей аппаратуры, впуска частиц и т.п. Введение длинных промежутков, имеющих единичную матрицу перехода, не потребовало увеличения размера камеры на круговой части и предполагает возможность достаточно оперативного изменения структуры промежутка для нужд эксперимента.

Каждый элемент периодичности, выполненный в виде одного магнитного блока, состоит из пяти участков: фокусирующего (Ф), заворачивающего (О), дефокусирующего (Д),

еще одного заворачивающего (0) и промежутка без поля (o), расположенного между блоками и предназначенного для размещения коммутаций.

Параметры отдельных элементов приведены в таблице:

	Ф	0	Д	0	o
Длина элемента (см)	48	104	51	89	15
Магнитное поле (кгс)	7,3	20	12,5	20	0
Расстояние до нейтрального полюса (см)	3,50	-	6,20	-	-
Градиент (кгс/см)	-2,08	0	2,02	0	0
Вертикальный зазор (см)	8,23	3,00	4,80	3,00	-

Среднее поле при этом составляет 15,8 кгс.

Существенно разные поля в фокусирующем и дефокусирующем магнитах сделаны для обеспечения радиационного затухания радиальных бетатронных колебаний, отсутствующего для обычной жесткой фокусировки.

Требуемый размер рабочей области магнитного поля составляет 6 см по радиусу и 3 см по вертикали.

Поперечное сечение различных участков блока показано на рис. 2.

Форма полюсов в рабочей области несколько отличается от гиперболической - в нее введены поправки, создающие квадратичную нелинейность, необходимую для устранения зависимости частот бетатронных колебаний от изменения энергии частицы при синхротронных колебаниях.

Фокусирующий и дефокусирующий участки изготавливаются прямыми (из-за малой длины этих участков "стрелка" составляет соответственно 1,5 и 2,5 мм) с помощью профилированных резцов во всю ширину обрабатываемого полюса.

Суммарная ошибка формы резца и обработки полюса вполне приемлемая - не более 0,03 мм.

Основная обмотка магнита состоит всего из двух витков с током в каждом до 25 ка, выполнена в виде прямоугольной шины со средним сечением 25 см² с впаянной медной трубкой для охлаждения. Общая мощность, потребляемая этой обмоткой, около 1600 киловатт.

Обмотки двух соседних магнитных блоков соединяются между собой с помощью четырех гибких соединений, изготовленных из медных проволочек сечением 0,3 мм, общей площадью 11 см². Полная мощность, потребляемая всеми 64 соединениями, составляет 4% мощности питания магнита.

В ф и Д магнитах имеются дополнительные обмотки, содержащие четыре витка и рассчитанные на ток два килоампера. С помощью этих витков можно изменять частоты бетатронных колебаний ($\Delta\nu = \pm 0,5$), а также компенсировать потерю ампервитков на магнитопроводе при больших полях.

При изменении частот бетатронных колебаний с помощью этих витков одновременно происходит изменение поля на равновесной орбите, однако максимальная потеря рабочей области из-за искажений орбиты не превышает 1,5 мм.

Для введения или компенсации квадратичной и кубичной нелинейностей в ф и Д магниты введены сосредоточенные обмотки. Оптимальное расположение этих обмоток, их количество и необходимые в них токи были подобраны расчетным путем на вычислительной машине с последующей экспериментальной проверкой. Эти витки обеспечивают введение квадратичной нелинейности ± 10 эрстед/см² и кубичной - ± 4 эрстед/см³. Расположение витков видно на рис. 2.

Искажение орбиты по радиусу можно корректировать с помощью обмоток, расположенных в заворачивающих магнитах. Эти обмотки создают до 150 эрстед вертикального поля. Искажения орбиты по вертикали корректируются однородным радиаль-

ным полем до 100 эрстед, создаваемым распределенными по поверхности гиперболических полюсов токами.

Крепление всех обмоток к магниту осуществляется заливкой их эпоксидной смолой.

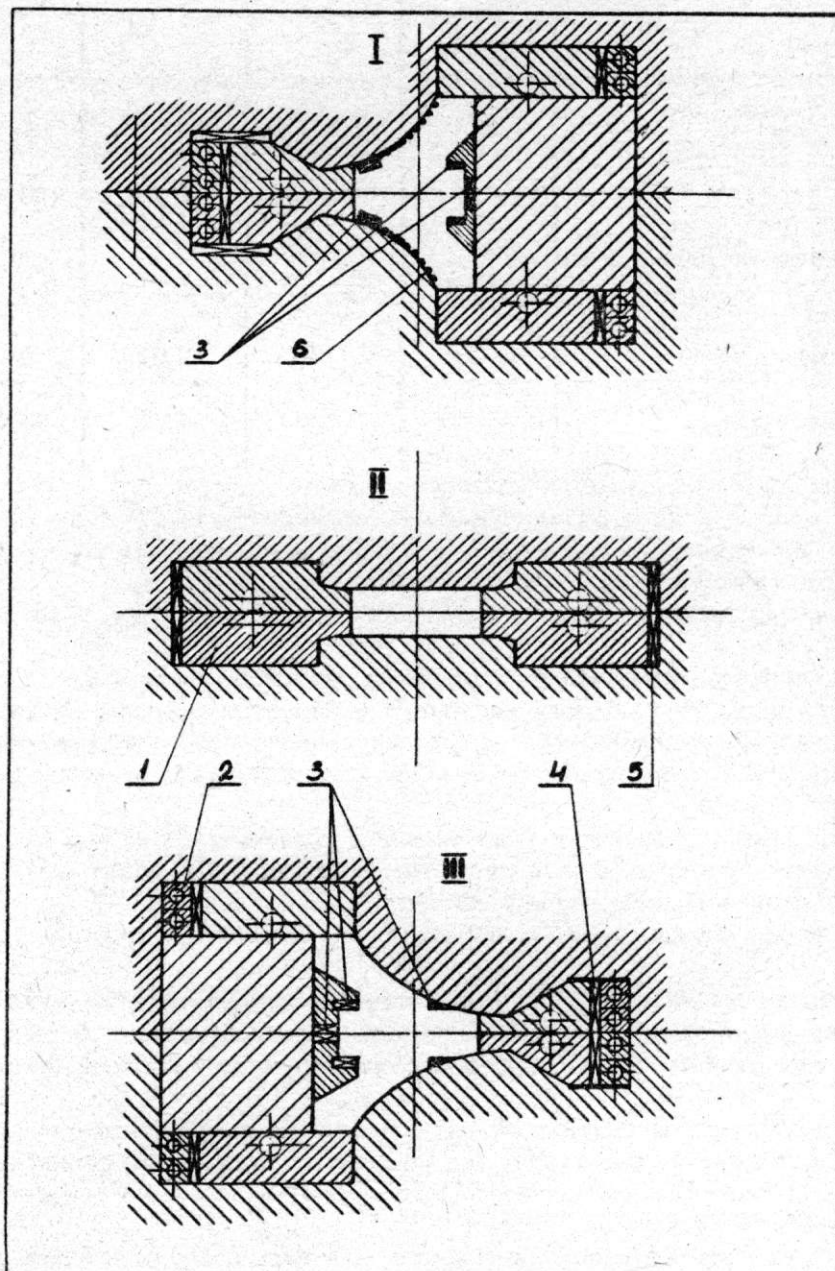


Рис. 2. Поперечные сечения магнитного блока:
 I - фокусирующий магнит, II - заворачивающий магнит, III - дефокусирующий магнит. 1 - основная обмотка на 25 ка, 2 - дополнительная обмотка на 2 ка, 3 - обмотка для создания нелинейного поля, 4 - обмотка коррекции градиента поля, 5 - обмотка коррекции по радиусу, 6 - обмотка коррекции по вертикали

Квадрупольные линзы прямолинейных промежутков (рис. 3) имеют длину 60 см и градиент 3,2 кгс/см при питании током в 2 килоампера. Рабочая область линзы 3,5 x 7 см².

Для всех магнитопроводов использовалось железо марки "Э" (типа "Армко"); после предварительной грубой обработки полосов магнита, оно отжигалось при температуре 750°C для улучшения магнитных характеристик и снятия остаточных механических напряжений.

Общий вес железа электромагнитов ~ 50 тонн.

Общий вес меди около 5 тонн.

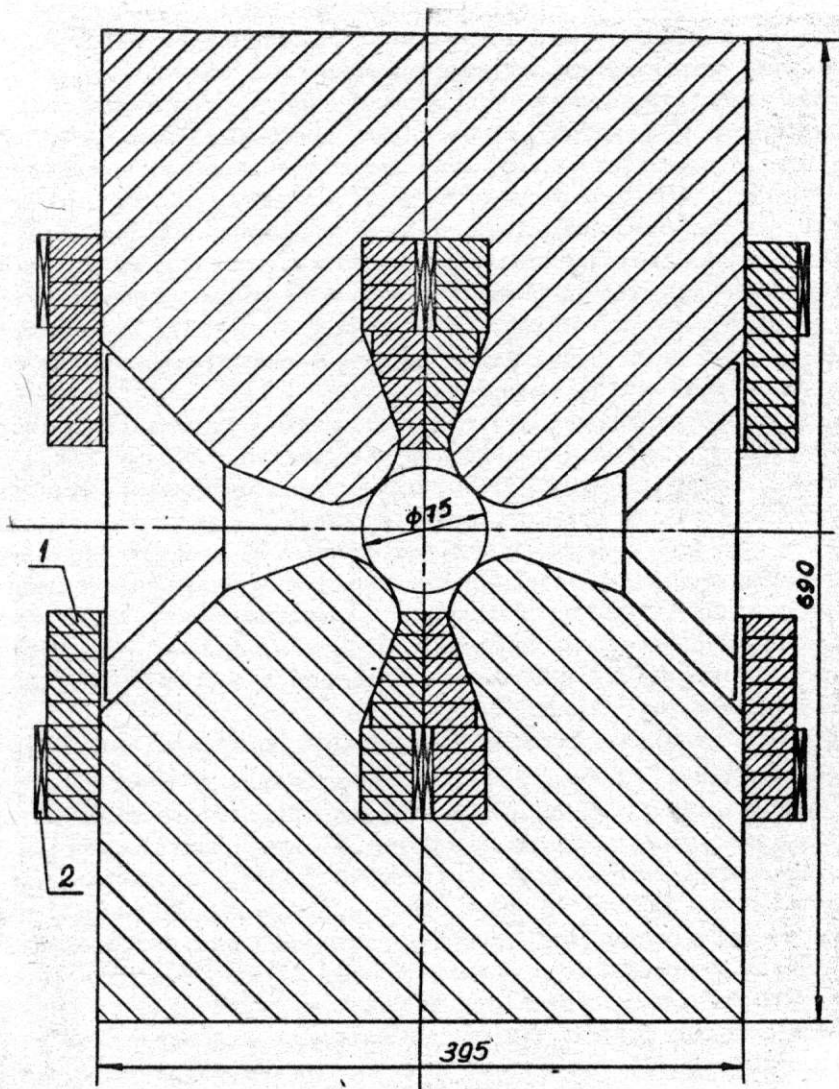


Рис. 3. Квадрупольная линза: 1 – основная обмотка на 2 ка, 2 – корректирующая обмотка

ЛИТЕРАТУРА

1. G.L. Budker, I. Ya. Protopopov, A.N. Scrinsky, Proc. of the Sixth Int. Conference on High Energy Accelerators, Cambridge, 1967, p. 102.

40. РАЗРАБОТКА СИСТЕМ ПИТАНИЯ ДЛЯ МАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ БЕЗЖЕЛЕЗНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ *)

М.Ю. Гельцель, А.А. Лившиц, А.А. Соколов, А.А. Тувик

Работы по встречным пучкам в Институте ядерной физики СО АН СССР, в отличие от других физических инструментов как отечественных, так и зарубежных, основываются на применении безжелезных ускорителей. Характерной особенностью их конструкции является принцип формирования магнитных полей с помощью скин-эффекта в сплошных медных поверхностях (одновитковые магнитные системы) [1]. Сооружение ускорителей такого типа потребовало новых технических решений в устройствах питания магнита. Так, например, для создания ведущего магнитного поля в электронном синхротроне Б-4 [2] при конечной энергии ~ 450 Мэв требуется амплитуда тока в импульсе ~ 150 ка, а коммутируемая пиковая мощность при времени ускорения $1 \div 2$ мсек достигает нескольких сотен мегавольтампер. При частоте повторения циклов ускорения ~ 10 гц средняя мощность, затрачиваемая на питание магнита, составляет сотни киловатт. Поэтому в системе возбуждения одновитковых магнитов целесообразно было использовать схемы с рекуперацией электрической энергии, оставшейся после цикла ускорения в обмотке магнита. Это может быть осуществлено только с помощью коммутаторов тока, обладающих односторонней проводимостью (вентилей). Ограниченные возможности управляемых вентилях, выпускаемых промышленностью, затрудняют коммутацию пиковой мощности упомянутой величины.

Таким образом, основной проблемой при создании систем питания магнитов безжелезных ускорителей является вопрос коммутации больших импульсных токов с возможностью рекуперации энергии. Задача коммутации столь больших импульсных токов миллисекундной длительности для существующих вентилях (игнитронов, тиратронов, тиристоров) может быть, вообще говоря, решена параллельной работой большого (несколько десятков) числа таких приборов. Однако сложность включения очень большого числа вентилях в параллельную работу потребовала решения целого ряда вопросов. Практика отечественных и зарубежных предприятий, занимающихся разработкой систем питания магнитов ускорителей еще не сталкивалась с непосредственной коммутацией токов с подобными параметрами [3,4].

Совместная работа Всесоюзного Электротехнического института им. В.И. Ленина и Института ядерной физики СО АН СССР *) по исследованию и усовершенствованию управляемых вентилях-игнитронов с целью их использования в системах питания безжелезных ускорителей позволила создать генератор однополярных импульсов тока для возбуждения ведущего магнитного поля в синхротроне Б-3М с необходимыми параметрами (рис. 1). Параллельная работа 18 игнитронов в импульсном режиме с коэффициентом перегрузки по току более 10 потребовала провести ряд исследований с целью определения оптимальной и наиболее устойчивой схемы их включения на общую нагрузку. Это дало возможность получить ток в шинах магнита ~ 100 ка в импульсе длительностью $2 \cdot 10^{-3}$ сек при напряжении конденсаторного накопителя ~ 2 кв. В 1966 году на синхротроне Б-3М (инжекторе для позитрон-электронного накопителя ВЭПП-2) была получена энергия электронов ~ 250 Мэв при устойчивой и надежной работе системы питания магнита.

Одновременно с разработками систем питания проводились исследования управляемых полупроводниковых вентилях-тиристоров в импульсном режиме с целью замены ими игнитронов, что дало бы возможность повысить надежность работы системы и упростить ее эксплуатацию. Кроме того, проводились поисковые работы по созданию вентилях, способного коммутировать значительно большие импульсные токи (> 10 ка).

Исследования тиристоров в импульсном режиме показали, что при длительности импульсов $1 \div 2$ мсек они допускают в течение длительного времени ($> 10^6$ импульсов) перегрузку по току более чем в 20 раз ($4 \div 5$ ка для ВКДУ 150) при частоте повторения 10 гц. Несмотря на сравнительно малую тепловую емкость тиристоров, такие перегрузки по току не приводят к разрушению прибора, так как тепловая постоянная $\tau_{\text{п}}$ -перехода довольно велика ($> 2 \cdot 10^{-3}$ сек) и температура перехода не успевает

*) Под руководством А.А. Наумова.

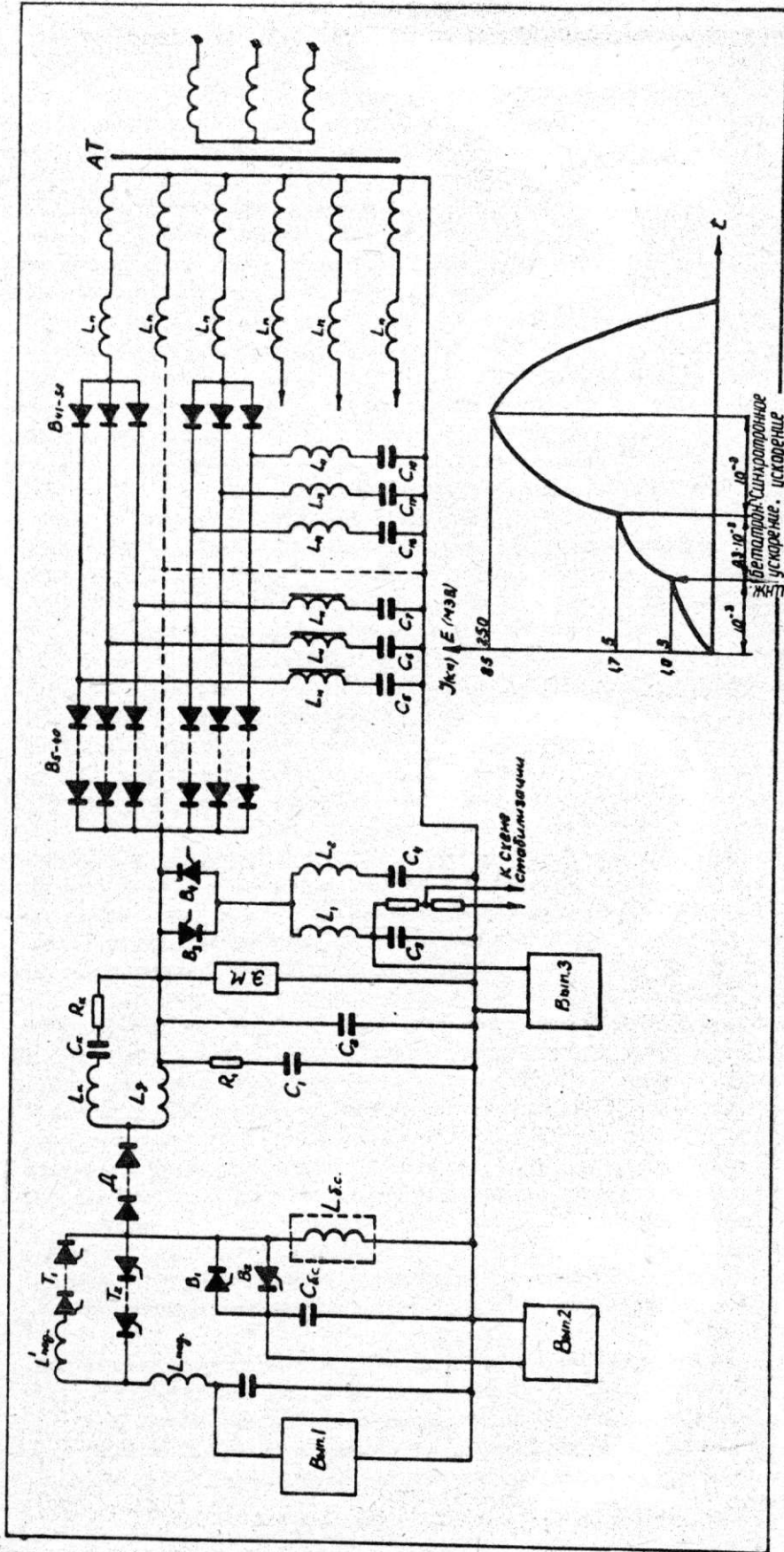


Рис. 1. Схема питания магнита синхротрона Б-3М. Элементы схемы питания бетатронного сердечника: $L_{дс}$ - бетатронный сердечник, $C_{бс}$ - конденсаторная батарея, B_{1-2} - игнитроны ИВС 500/5, Вып 2 - выпрямитель 3 кв. Элементы схемы импульсного подмагничивания сердечника: T_1, T_2 - тиристоры ВКДУ-150, $L_{под}$ - индуктивность, Вып 1 - выпрямитель 2 кв, C_n - конденсаторная батарея, Элементы генератора импульсов тока для возбуждения квазипостоянного поля инжекции: L_1, L_2 - индуктивности, C_3, C_4 - конденсаторная батарея, Вып 3 - выпрямитель 10 квт, B_3, B_4 - игнитроны ИВС 500/5. Элементы генераторов импульсов тока для возбуждения ведущего поля: АТ - анодный трансформатор ТМ-1800/35, B_5-40 - игнитроны ИВС 500/5, B_{41-58} - игнитроны ИВС 200/10, $L_{н}$ - насыщающаяся дроссели, C_5-18 - конденсаторная батарея (27:10-3 ф). Элементы коррекции и связи бетатронного сердечника с магнитом ускорителя: $L_k, C_k, R_k, L_d, Э.М.$ - магнит ускорителя ($L_M \sim 10$ мкГн), D - мощные диоды ВК-200, R_1, C_1, C_2 - элементы, уменьшающие амплитуду паразитных колебаний системы

нарасти до температуры разрушения ($\sim 300^\circ$). Однако большая чувствительность тиристоров к скорости нарастания тока, а следовательно к переходным и аварийным режимам, ограничивает в настоящее время использование их в мощных системах питания магнитов [5].

При поисковых работах созданы образцы новых управляемых вентилях с твердым холодным катодом, действующих на принципе, аналогичном тому, который используется в вакуумных выключателях переменного тока [6]. Вентильные свойства их надежно сохраняются при коммутации синусоидальных импульсов тока с амплитудой ~ 50 ка при скорости спада тока $\sim 10^8$ а/сек и обратном напряжении $4 \div 5$ кв. Использование в таких вентилях короткой дуги ($5 \div 6$ мм) при начальном давлении $\leq 10^{-2}$ мм рт.ст. с искровым поджигом позволяет увеличить прочность перед зажиганием дугового разряда до 10 кв и более, упростив при этом эксплуатацию таких приборов, так как в них не требуется специальное газовое наполнение. Создание таких приборов позволило реализовать принцип однополярного режима по току в нагрузке с использованием перезарядного импульса в качестве рабочего [7] в синхротронах с одновитковой обмоткой магнита при сравнительно небольшом количестве коммутаторов тока ($8 \div 16$) [8]. Работа генератора в течение длительного времени (с января 1968 г.) показала его высокую надежность и простоту эксплуатации. С целью уменьшения величины импульсных токов, протекающих через вентили, и одновременного увеличения длительности импульса, может быть использован импульсный трансформатор, так как это сделано, например, в системе питания магнита Б-4 (рис. 2).

Задача увеличения электронного тока в синхротроне Б-4 путем использования после инжекции бетатронного ускорения с предварительным спиральным накоплением частиц потребовала создания системы питания бетатронного сердечника с импульсным током ≥ 15 ка, при напряжении на обходе ≥ 15 кв и скоростью нарастания тока $> 5 \cdot 10^8$ а/сек. Коммутация токов с такой скоростью нарастания такой величины в принципе возможна при параллельном соединении довольно большого числа мощных водородных тиристоров. Однако скорость спадания тока в такой системе должна быть очень мала, чтобы не происходило торможение уже ускоренных частиц. Такой режим спадания электрических и магнитных полей может быть получен в режиме "клубар", т.е. закорачивания нагрузки вентилем в момент, близкий к максимуму тока. Так как постоянная времени спада тока довольно велика (миллисекунда и более), то использование водородных тиристоров становится недопустимым.

Исходя из этих соображений для питания бетатронного сердечника были исследованы управляемые вентили с твердым холодным катодом. Испытание таких вентилях в импульсах длительностью $\sim 50 \div 100$ мксек при напряжении 6 кв и токе ~ 40 ка дали положительные результаты. Использование импульсного трансформатора с коэффициентом трансформации 3 даст возможность получить требуемые параметры системы питания бетатронного сердечника.

При формировании импульса тока магнитного поля инжекции необходимо было выполнить условия, вытекающие из специфики работы синхротрона с однооборотной инжекцией; стабильность напряженности магнитного поля $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ и наличие квазипостоянного участка поля. Получение необходимой стабильности осуществляется параметрической стабилизацией элементов генератора и стабилизацией соответствующих напряжений. Для формирования импульса тока квазипостоянного магнитного поля инжекции используется принцип наложения на косинусоидальный импульс одной из высших его гармонических составляющих. С целью уменьшения потерь в генераторе, связанных с совместной работой с генератором ведущего поля при ускорении возможно использование специальных схем, рекуперирующих энергию обратно из контура генератора ведущего поля или полностью устраняющих влияние одного генератора на другой.

Анализ систем зарядки конденсаторных накопителей (десятки тысяч микрофард) для питания магнитов импульсных синхротронов показывает, что наибольший к.п.д. получается при зарядке таких накопителей постоянным по величине током. В этом случае напряжение на конденсаторной батарее растет линейно. Это положение привело к созданию системы зарядки емкостного накопителя синхротрона Б-4 с автоматическим регулированием зарядного тока.

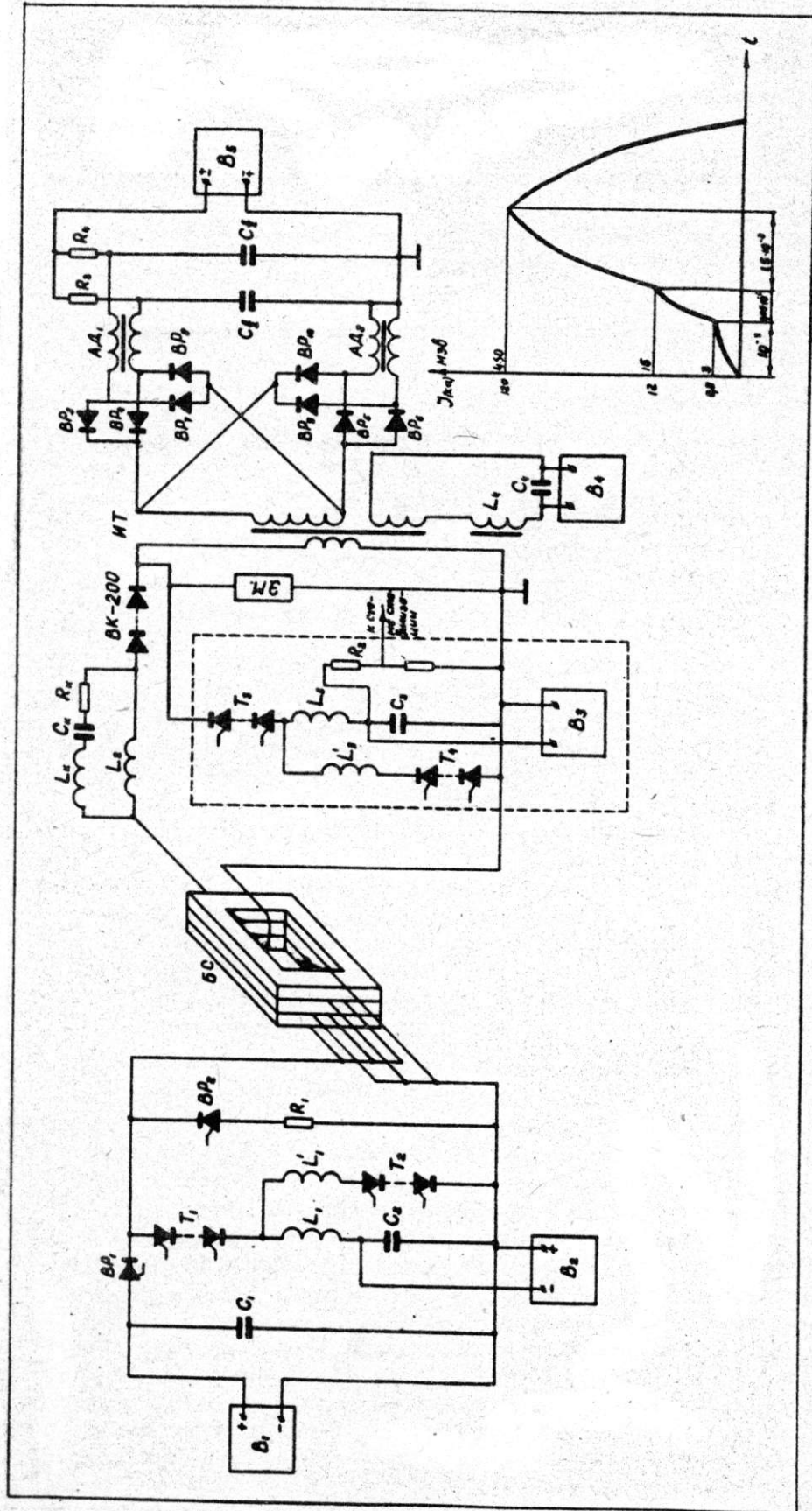


Рис. 2. Схема питания магнита синхротрона Б-4. В₁ - выпрямитель 6 кв, 50 квт. Элементы схемы питания бетатронного сердечника: ВР₁₋₂ - управляемые вентили с твердым холодным катодом, С₁ - конденсаторная батарея 150 мкф, ВС - бетатронный сердечник-трансформатор (п ~ 3). Элементы схемы импульсного подмагничивания сердечника: С₂ - конденсаторная батарея 600 мкф, Т₁₋₂ - тиристоры ВКДУ-150, ПТЛ-150, L₁, L₁' - индуктивности (300 мкГн), В₂ - выпрямитель 2 кв, 2 квт. Элементы генератора импульсов тока магнитного поля инжекции: L₃, L₃' - индуктивности (150 мкГн), С₃ - конденсаторная батарея (1200 мкф), Т₃₋₄ - тиристоры ВКДУ-150, ПТЛ-150, В₃ - выпрямитель 10 квт. Элементы генератора импульсов тока для возбуждения ведущего поля: ИТ - импульсный трансформатор (п = 2 или 4), АД₁₋₂ - анальные делители (двухобмоточные), С₅ - конденсаторная батарея (~ 30 · 10⁻³ ф), В₅ - выпрямитель с автоматическим регулированием зарядного тока (1 мвт), ВР₃₋₁₀ - коммутирующие вентили с твердым холодным катодом (ток ~ 40 ÷ 50 ка). ЗМ - электромагнит ускорителя (L_М ~ 15 · 10⁻⁶ гн); Д - диоды типа ВС-200, L_К, C_К, R_К, L₂ - элементы коррекции и связи бетатронного сердечника с магнитом ускорителя

Дальнейшее увеличение энергии ускоренных частиц, особенно в протонных безжелезных синхротронах, требует резкого увеличения токов для возбуждения магнитных полей (≥ 100 кГс) в таких ускорителях. Это, в свою очередь, уже в настоящее время требует создания еще более сильноточных коммутаторов тока, например, с жидкометаллическими или твердыми контактами, надежно коммутирующими токи $\sim 10^6$ а и более, в течение десятых и сотых долей секунды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Будкер Г.И. и др. Proc. of the V Int. Conference on High Energy Accelerators, Frascati, 1965, p. 455.
2. Лившиц А.А., Маклаков Ю.В. Магнит синхротрона Б-4.
3. Агбалян Ю.Г., Комар Е.Г. и др. Труды Международной конференции по ускорителям. Дубна, 1963, стр. 235.
4. Водопьянов Ф.А. Там же, стр. 213.
5. Мощные полупроводниковые приборы. Труды Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (Русский перевод), 1967, том 55, № 8.
6. Попов Н.А. Вакуумные выключатели. М.-Л. "Энергия", 1965.
7. Ивашин В.А., Сипайлов Р.А. ПТЭ, 1968, № 5, стр. 151.
8. Гельцель М.Ю., Панасюк В.С. ПТЭ, 1968, № 5, стр. 223.

Е.А. Абрамян, С.Б. Вассерман (Институт ядерной физики Сибирского отделения АН СССР)

Ускорители заряженных частиц, использовавшие трансформатор Тесла в качестве генератора высокого напряжения, были построены еще в конце 20-х - начале 30-х годов [1]. Однако дальше создания первых образцов развитие ускорителей этой системы в то время не пошло. Объясняется это, очевидно, тем, что первые установки на основе трансформатора Тесла имели неудовлетворительные характеристики: малая доля энергии, передаваемой в высоковольтный контур, большая немонотонность и слабая интенсивность пучка, подверженность витковой изоляции высоковольтной обмотки пробоям и др.

Ряд усовершенствований, внесенных в ускорители этого типа [2], позволил нам разработать относительно простые и компактные установки для ускорения электронов на энергии от сотен кэВ до нескольких МэВ с высокой импульсной и средней мощностью и к.п.д. до 70-80%.

Основные отличия таких установок:

- а) значительно увеличен коэффициент связи контуров трансформатора; как правило, он имеет оптимальную величину, равную 0,6;
- б) введено в необходимых случаях управление током пучка;
- в) в ускорителях, предназначенных для работы с большой средней мощностью, после первого цикла колебаний осуществляется размыкание первичного контура (режим рекуперации энергии);
- г) вторичная обмотка имеет экран емкостной защиты от перенапряжений.

Электрическая схема ускорителя представлена на рис. 1. Первичный (L_1, C_1) и вторичный (L_2, C_2) контуры трансформатора настроены в резонанс. Зарядное устройство З.У. заряжает конденсатор C_1 , после чего замыкается коммутатор К, и в системе связанных контуров возникают свободные колебания. Напряжения в контурах с момента включения коммутатора (без учета затухания) меняются по законам

$$U_1 = \frac{U_{01}}{2} \left(\cos \frac{\omega_0}{\sqrt{1+k}} t + \cos \frac{\omega_0}{\sqrt{1-k}} t \right)$$

$$и \quad U_2 = \frac{U_{01}}{2} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \left(\cos \frac{\omega_0}{\sqrt{1+k}} t - \cos \frac{\omega_0}{\sqrt{1-k}} t \right),$$

где U_{01} - начальное напряжение на конденсаторе C_1 , ω_0 - собственная частота каждого из контуров, $k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$ - коэффициент связи контуров.

Величина коэффициента связи существенно влияет на характеристики трансформатора Тесла. Как правило, целесообразно иметь $k = 0,6$. В этом случае напряжение U_2 достигает максимума уже на второй полуволне колебаний. В отдельных установках приемлема величина $k = 0,385$ (максимум вторичного напряжения на третьей полуволне).

На рис. 2 показаны кривые напряжений в контурах и импульсы тока ускоренных частиц для случая $k = 0,6$ при работе с трубкой, имеющей управление током пучка (рис. 1, вариант а).

Прекращение колебаний в момент времени t_1 (режим рекуперации) позволяет сохранить значительную часть энергии контуров, и после подзарядки конденсатора C_1 система готова к новому циклу работы.

Для работы в режиме рекуперации энергии коммутатор К должен помимо замыкания первичного контура осуществлять его разрыв в нужный момент. При собственных частотах контуров $\geq 10^4$ гц осуществление режима рекуперации энергии требует разработки специальных коммутаторов. Один из вариантов - коммутатор на основе импульсных водородных тиратронов [3] - применен в ускорителях на энергию 1 МэВ, имеющих собственную частоту контуров порядка 70 кгц. Для ускорителей, работающих с редкими импульсами, режим рекуперации энергии не представляет интереса, и в этом случае используются обычные разрядники.

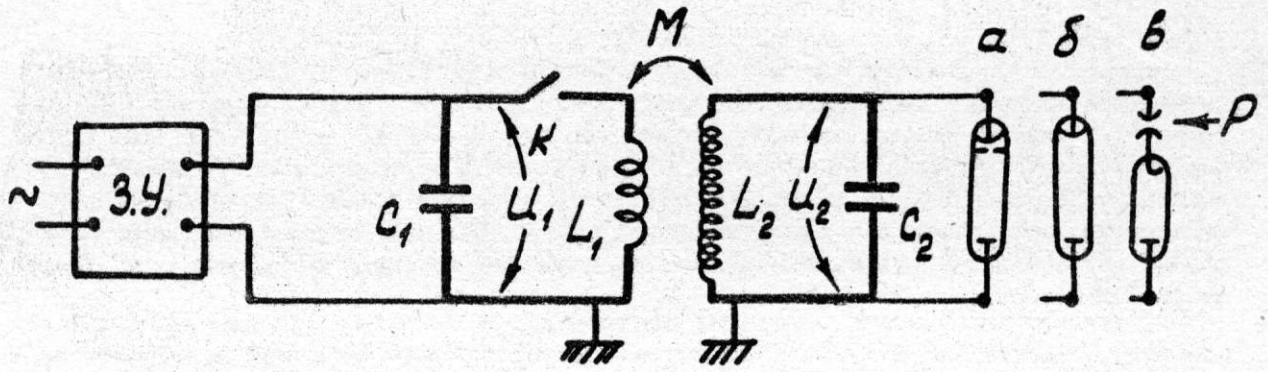


Рис. 1. Электрическая схема установки с различными вариантами ускорительной трубки: а) управляемая трубка; б) неуправляемая трубка; в) неуправляемая трубка, включенная через разрядник-обостритель. ЗУ - зарядное устройство; К - коммутатор первичного контура; Р - разрядник-обостритель; C_1 - емкость первичного контура; L_1 - индуктивность первичной обмотки трансформатора; L_2 - индуктивность вторичной обмотки трансформатора; C_2 - емкость вторичного контура

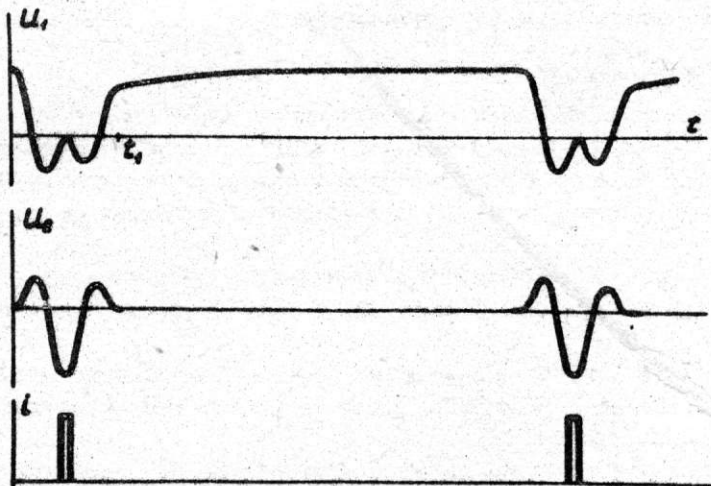


Рис. 2. Кривые напряжений в контурах и тока пучка ($k = 0,6$): U_1 - напряжение на конденсаторе первичного контура, U_2 - напряжение на вторичной обмотке (трубке), i - ток пучка

К настоящему времени разработано несколько типов ускорителей описанной системы. Ускорители ЭЛИТ-1 и ЭЛИТ-3 на энергии 1 Мэв и 3 Мэв соответственно предназначены в основном для физических исследований и применения в качестве инжекторов. Эти установки дают импульсы тока электронов до 30а с длительностями от 50 нсек до 2 мсек с частотой следования импульсов до 50 гц. Несколько ускорителей ЭЛИТ-1 работают в Институте ядерной физики СО АН СССР и других организациях.

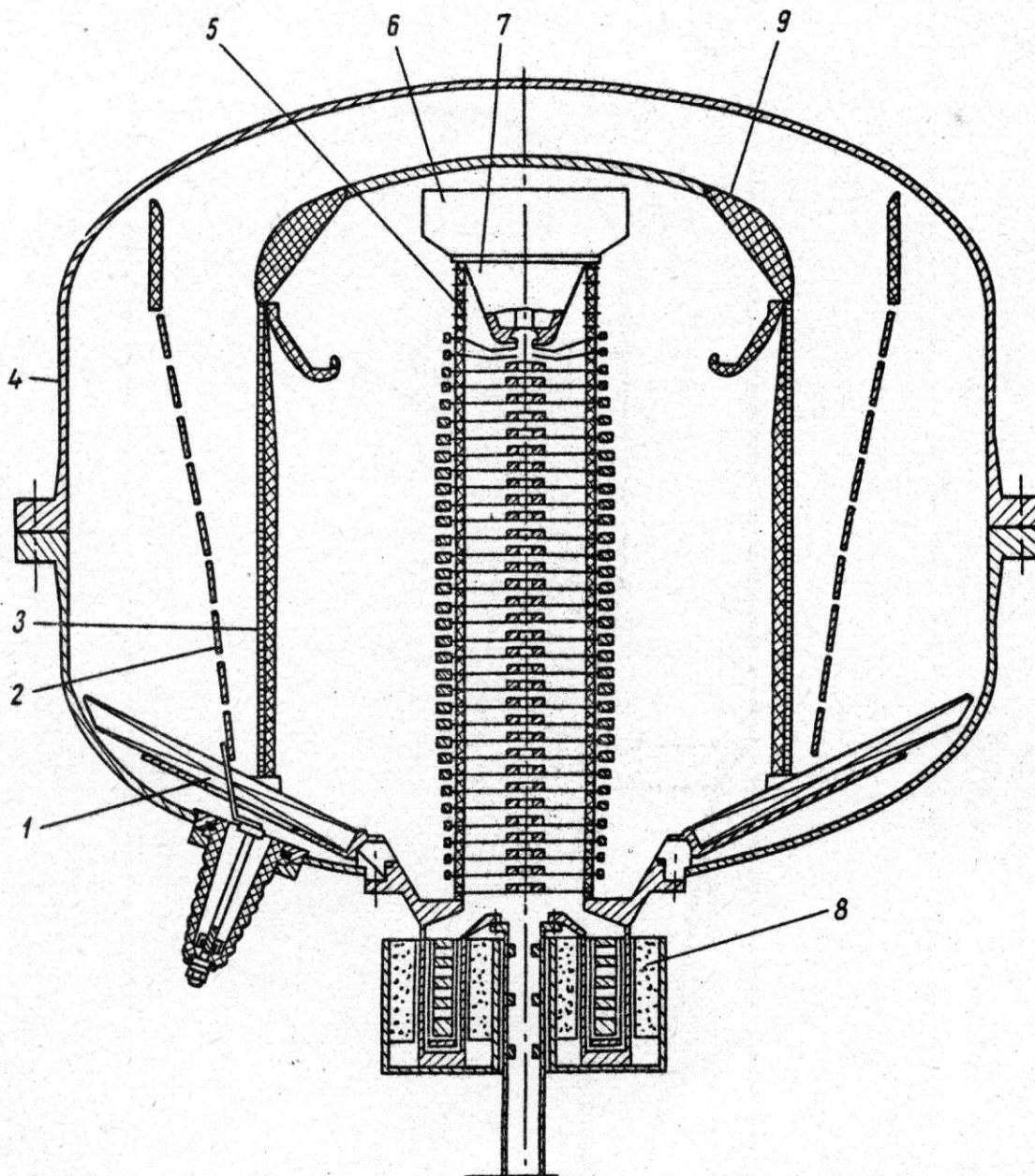


Рис. 3. Конструкция ускорителя ЭЛИТ-1А: 1 - магнитопровод; 2 - первичная обмотка; 3 - вторичная обмотка; 4 - котел; 5 - ускорительная трубка; 6 - нагревательный трансформатор; 7 - электронная пушка; 8 - магниторазрядный насос; 9 - высоковольтный электрод

Для промышленных целей построен ускоритель ЭЛИТ-1А на энергию 1 Мэв и среднюю мощность пучка 10 квт. Конструкция этого ускорителя представлена на рис. 3. В стальном котле диаметром 900 мм и высотой 800 мм коаксиально размещены первичная и вторичная обмотки трансформатора и металлокерамическая ускорительная трубка.

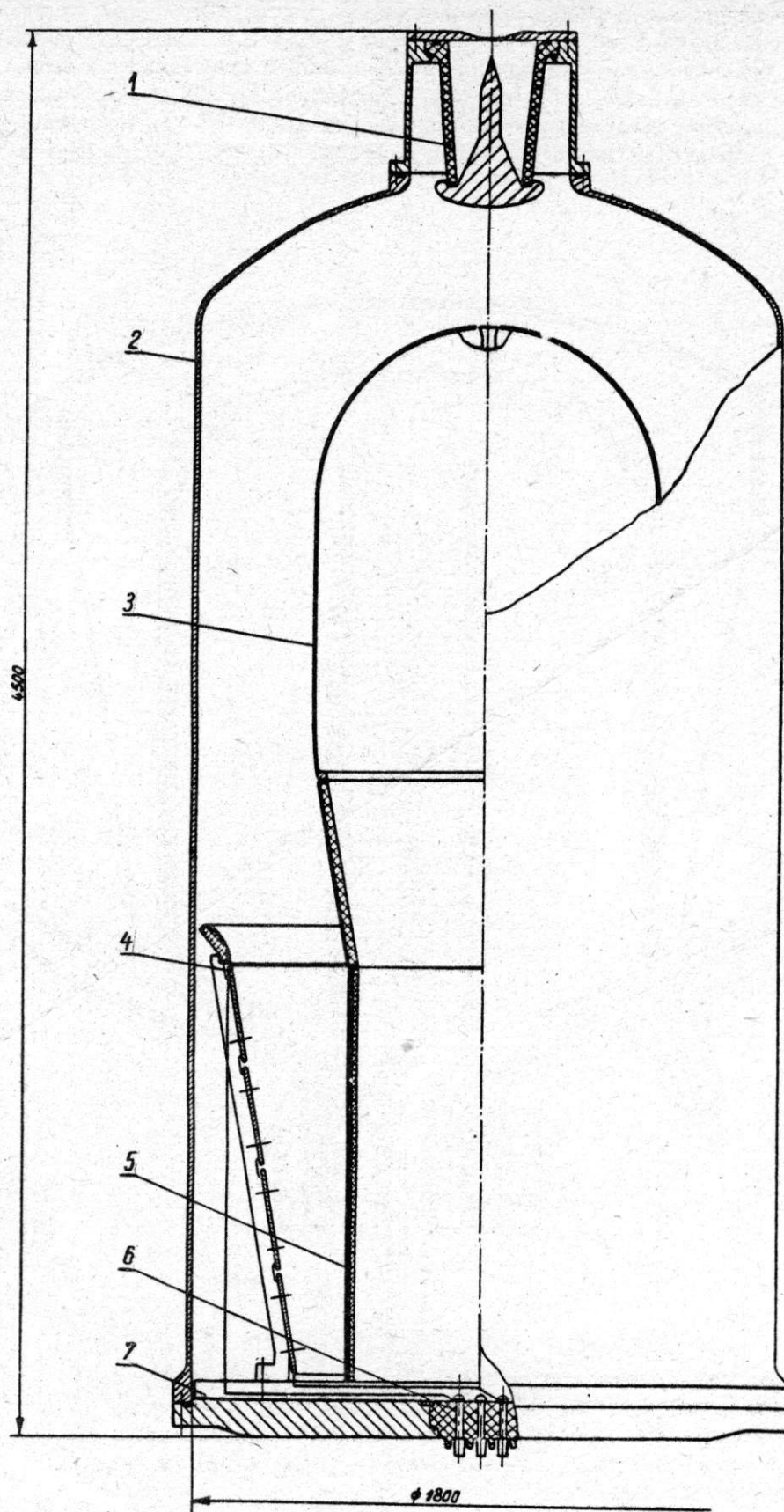


Рис. 4. Конструкция генератора коротких импульсов жесткого рентгеновского излучения РИУС-5: 1 - ускорительная трубка; 2 - котел; 3 - кондуктор; 4 - первичная обмотка; 5 - вторичная обмотка; 6 - выводы первичной обмотки; 7 - магнитопривод

Расположенный внутри вторичной обмотки в ее верхней части экран создает с витками этой части обмотки емкости, выравнивающие градиент вдоль обмотки при пробоях в системе по полному напряжению.

Откачка трубки осуществляется магниторазрядным насосом круглой формы, установленным под трубкой и создающим в ней вакуум 10^{-6} - 10^{-7} тор. Котел ускорителя заполняется газом под давлением до 8 атм (элегаз либо смесь фреона - 12 с азотом).

На рис. 4 показана конструкция генератора одиночных коротких импульсов жесткого рентгеновского излучения с параметрами импульса:

- 1) напряжение на кондукторе 5-7 Мв;
- 2) энергия ускоренных электронов 3-5 Мэв;
- 3) длительность импульса рентгеновской вспышки 20 нсек;
- 4) общая энергия, запасаемая в высоковольтной емкости 10-14 кдж.

Генератор выполнен по схеме рис. 1, вариант в.

В настоящее время ведутся разработки различных модификаций установок для у-дефектоскопии на энергии от нескольких сотен кэв до нескольких Мэв с диодными трубками (рис. 1, вариант б). В качестве изолирующей среды используются сжатый газ или трансформаторное масло.

Более подробные данные о разработанных ускорителях на основе трансформатора Тесла, системах их питания, наладке и т.п. содержатся в работах [4,5] и материалах VII Межвузовской конференции по электронным ускорителям (Томск, 1968 г.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Breit G. et al, Phys. Rev., 35, 51, (1930).
2. Абрамян Е.А., Вассерман С.Б., Галонов В.А., Крайнов Г.С.. Ускоритель заряженных частиц. Авторское свидетельство № В1878.
3. Егоров А.А., Панасюк В.С., Ширкин С.М. ПТЭ, № 4, (1968).
4. Абрамян Е.А., Вассерман С.Б., Атомная энергия, 23, 1, (1967).
5. Труды VI Межвузовской конференции по электронным ускорителям, Томск (1968 г.), стр. 351-369.

84. МОНОХРОМАТИЗАЦИЯ ПОЗИТРОННОГО ПУЧКА НА КЛИНООБРАЗНОМ ЗАМЕДЛИТЕЛЕ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАХВАТА В НАКОПИТЕЛЬ*

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

Конверсия электронов в позитроны путем радиационного торможения и рождения пар характеризуется непрерывным спектром позитронов на выходе мишени. Угловое распределение позитронов высоких энергий (≥ 100 Мэв) на выходе конвертера толщиной в 1 радиационную единицу при отношении энергии позитронов E^+ к энергии первичных электронов $E^- E^+/E^- = 0,4 - 0,6$ характеризуется среднеквадратичным углом $\sqrt{\theta^2} \sim 10/E^+ (\text{мэв})$ радиан. При оптимальной фокусировке электронов и позитронов может быть достигнуто практически полное собирание позитронов заданного энергетического интервала в сравнительно небольшом поперечном фазовом объеме, как это имеет место при инжекции в накопитель ВЭПП-2 [1].

Дальнейшее увеличение числа собираемых позитронов может быть достигнуто за счет расширения энергетического интервала. В случае инжекции в накопитель прямое расширение энергетического интервала захвата сопровождается увеличением амплитуды ρ_0 радиально-фазовых колебаний и, при заданной радиальной апертуре $2A_0$, возможно лишь в небольших пределах. Если впускаемый пучок равномерно заполняет весь радиальный адмитанс накопителя, оптимальный энергетический интервал характеризуется амплитудой радиально-фазовых колебаний, равной половине радиальной апертуры камеры $\rho_0 = 1/2 A_0$; уменьшение радиального размера пучка в 3 раза и по координате и по углу, что в 9 раз уменьшает его эмиттанс, позволяет расширить энергетический интервал захвата до $\rho_0 = 0,72 A_0$. Эффективность захвата частиц, усредненная по эмиттансу пучка, возрастает при этом от 0,43 до 0,70.

В настоящей работе рассматривается способ увеличения коэффициента захвата в накопитель путем повышения плотности спектра в заданном интервале за счет ионизационных потерь в клинообразном замедлителе. Ионизационные потери в веществе в среднем пропорциональны толщине мишени, так что фокусируя пучок на клинообразную мишень с дисперсией энергии частиц по координате можно добиться выравнивания их средней энергии.

Распределение частиц по энергиям на выходе мишени определяется статистическим разбросом ионизационных потерь Δ вокруг наиболее вероятного значения Δ_0 , к

торый описывается функцией $\varphi\left(\frac{\Delta - \Delta_0}{\xi}\right) d\left(\frac{\Delta - \Delta_0}{\xi}\right)$, вычисленной Ландау [2]. Ширина

кривой Ландау на половине ее высоты равна $\Gamma = 3,98$. При нормировке площади под кривой Ландау к 1, площадь внутри области Γ составляет 0,6. Наиболее вероятное значение ионизационных потерь для релятивистских электронов есть $\Delta_0 = \xi [9,43 + \ln t \text{ (см)}]$, где $\xi = 0,1536 \cdot t \text{ (г/см}^2\text{)}$. $\frac{Z}{A}$ мэв [3], t — толщина поглотителя.

При монохроматизации на клинообразной мишени ширина распределения частиц по энергиям во всех точках на выходе ее не должна превышать заданный энергетический интервал $\Delta E_{\text{кон}}$, то есть $\Gamma \xi \leq \Delta E_{\text{кон}}$. Из этого условия получаем максимальную толщину замедлителя t_0 и максимальный интервал начальных энергий, равный наиболее вероятной потере на толщине t_0 , $\Delta E_{\text{нач}} = \Delta_0(t_0)$ частицы из которого со значительной ($> 0,6$) вероятностью попадают в интервал $\Delta E_{\text{кон}}$. Отношение

$K = \Delta E_{\text{нач}} / \Delta E_{\text{кон}} = \frac{\Delta_0}{\Gamma \xi}$ можно назвать коэффициентом монохроматизации.

Угол наклона клина α находится из соотношения $\text{tg } \alpha = \frac{t_0}{\Delta r_0}$, где Δr_0 — смещение частицы с максимальным $\Delta E_{\text{нач}}$, обусловленное дисперсией энергии. Изложенный способ с монохроматизации применим для позитронов и электронов при энергиях, не превышающих критическую энергию вещества мишени, когда радиационные потери не приводят к существенному изменению картины.

Энергия инжекции позитронов в накопитель ВЭПП-2 $E_0 = 100$ Мэв, и в качестве замедлителя выбирается углерод, критическая энергия которого равна 103 Мэв. Энергетический интервал захвата в накопитель составляет 1% от энергии инжекции, так что $\Delta E_{\text{кон}} = 1$ Мэв, $t_0 = 3,3$ г/см² и коэффициент монохроматизации $K = 5,0$.

Влияние тормозного излучения на распределение потерь вокруг Δ_0 в первом приближении можно учесть как изменение нормировки площади под кривой Ландау, поскольку радиационное торможение сопровождается испусканием квантов с большим разбросом энергий. В результате число частиц в интервале $\Delta E_{\text{кон}}$ уменьшается в 1,82 раза для максимальной толщины замедлителя и в 1,33 раза для толщины $t = 1/2 t_0$. С учетом того, что вероятность попадания в интервал $\Delta E_{\text{кон}}$ для частиц с начальной энергией в интервале $(E_0, E_0 + K \cdot \Delta E_{\text{кон}})$ меняется от 1 до 0,33 и в среднем составляет 0,62, можно ввести эффективный коэффициент монохроматизации $K_{\text{эф}} = 0,62 \times 5,0 = 3,1$, определяющий увеличение плотности спектра в интервале $\Delta E_{\text{кон}}$.

Параметры магнита-спектрометра, обеспечивающего дисперсию энергии частиц по координате, и оптической схемы, осуществляющей фокусировку пучка на замедлитель и далее на вход в накопитель, определяются рядом условий, изложенных ниже.

Поскольку угловой разброс на конвертере составляет $\sim \pm 0,1$ радиана, а угловой размер аксептанса равен $\sim \pm 0,1$ радиана [1], суммарное увеличение оптической схемы от конвертера до входа в накопитель U должно быть не менее 10 по абсолютной величине. При этом увеличении U_1 схемы фокусировки позитронов с конвертера на замедлитель должно быть достаточно малым, чтобы угловой разброс в пучке оставался большим углов многократного рассеяния в замедлителе.

Третье ограничение состоит в том, что радиальный размер пучка на входе в накопитель ΔR , пропорциональный максимальной координате дисперсии на замедлителе Δr_0 , а именно, $\Delta R = \Delta r_0 \cdot \left| \frac{U}{U_1} \right|$, должен быть меньше радиальной апертуры камеры накопителя $2A_0$.

В принятой схеме магнит-спектрометр помещен непосредственно за конвертером и фокусирует пучок на замедлитель с увеличением $U_1 = -2$. При этом угловой разброс позитронов в плоскости изображения равен $\sim \pm 5 \cdot 10^{-2}$ радиана. С учетом угла многократного рассеяния в замедлителе угловой разброс на выходе замедлителя составляет $\pm 5,5 \cdot 10^{-2}$ радиана.

Поперечное смещение изображения пучка на замедлителе для энергии, отличной от равновесной на величину $\varepsilon = \Delta E/E_0$, равно $\Delta r(\varepsilon) = \frac{\varepsilon r_0}{1-n} (1-U_1)$, где r_0 — радиус магнита-спектрометра, n — показатель преломления. Последнее из перечисленных выше ограничений определяет максимальное значение $\Delta r(\varepsilon)$ как

$$\Delta r_0 \cdot \left| \frac{U}{U_1} \right| = K \frac{\Delta E_{\text{кон}}}{E_0} r_0 \frac{1-U_1}{1-n} \left| \frac{U}{U_1} \right| < 2A_0 = 8 \text{ см, откуда при } \left| \frac{U}{U_1} \right| \approx 6 \text{ для радиуса спектро-$$

метра получаем условие $r_0 < 4$ см. Приняв для радиуса магнита величину $r_0 = 3$ см, получаем $\Delta r_0 = 0,9$ см.

Монохроматизация позитронного пучка на клине приводит к увеличению радиального эмиттанса пучка в отношении максимальной координаты дисперсии Δr_0 к собственному размеру пучка на замедлителе, то-есть примерно в 4,5 раза в нашем случае, так как диаметр пучка на конвертере составляет ~ 1 мм. Это увеличение, однако, приводит к уменьшению эффективности радиального захвата всего в $\sim 1,3$ раза, поскольку начальный эмиттанс позитронного пучка значительно меньше радиального адитанса накопителя.

При использовании в качестве замедлителя графита с плотностью 2,3 г/см³ угол наклона клина равен 58°. Угол можно уменьшить до 47°, сделав замедлитель из алмаза. Большой угол наклона клина не позволяет использовать более легкие материалы, например, бериллий. Более тяжелые элементы не могут быть использованы из-за больших радиационных потерь и рассеяния в клине.

Для фокусировки электронного пучка в малый размер на конвертер и собирания позитронов в большом телесном угле требуются короткофокусные светосильные линзы, в качестве которых в сочетании с короткофокусным спектрометром выгодно использовать магниты малого радиуса с двойной градиентной фокусировкой. Соот-

ношение радиусов магнитов для электронов и позитронов удобно выбрать равным отношению $E^+/E^- = 2$, чтобы все три магнита имели одинаковые поля. При радиусе спектрометра, равном 3 см, радиус магнита, фокусирующего электроны, равен 6 см и радиус магнита, собирающего позитроны с замедлителя, -3 см. Такие радиусы поворота при энергиях до $E = 240$ Мэв требуют поля до 135 кэ.

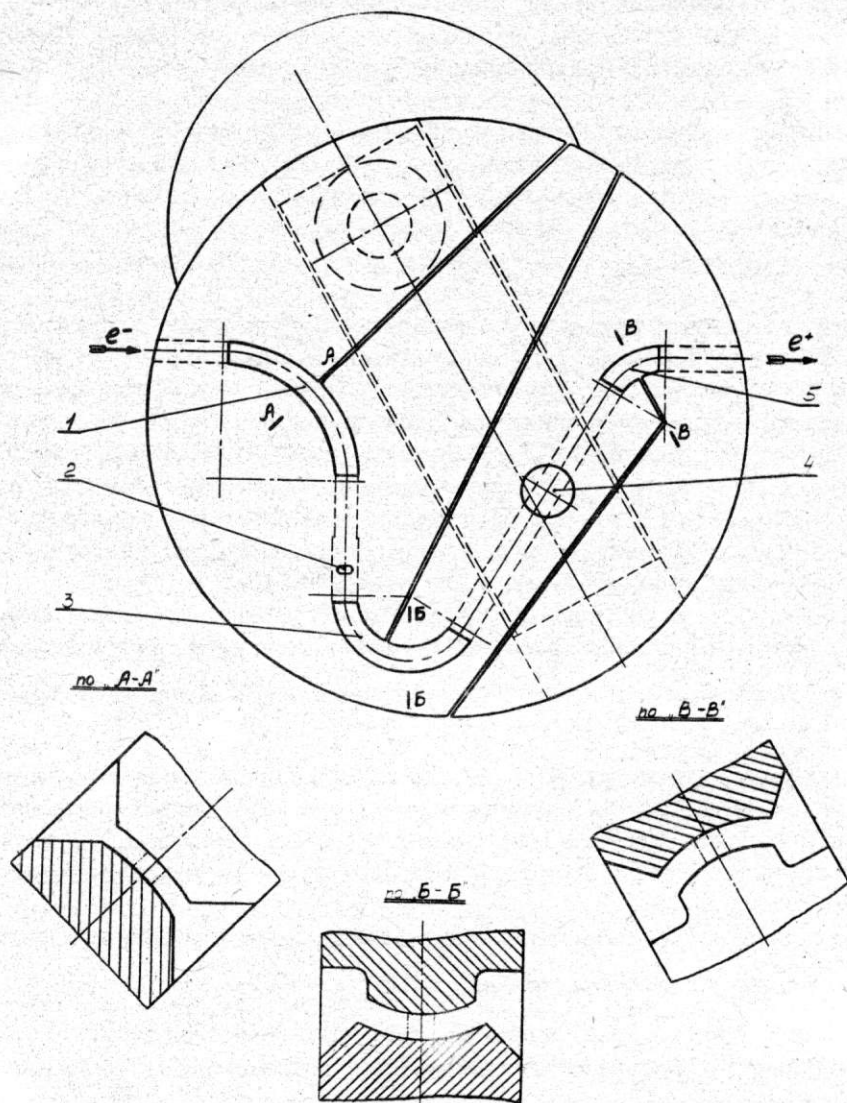


Схема магнитов блока конверсии с клинообразным замедлителем: 1 - электронный фокусирующий магнит; 2 - конвертер; 3 - магнит-спектрометр; 4 - клинообразный замедлитель; 5 - собирающий позитронный магнит

Геометрия системы из трех магнитов показана на рисунке. Электронный фокусирующий магнит 1 имеет угол поворота 90° , апертуру $\pm 0,5$ см и фокусирует электроны в точку на расстоянии 3 см от выходного края, где и помещается конвертер 2. Магнит-спектрометр 3 с углом поворота 150° и апертурой $\pm 0,6$ см фокусирует пучок с увеличением $U_1 = -2$ на клин 4 расположенный в 6 см от выходного края спектрометра. Третий магнит с углом поворота 60° и апертурой $\pm 0,6$ см собирает позитроны с клина и дает изображение пучка с увеличением ~ 6 на расстоянии ~ 50 см от выходного края. Конструктивно все магниты выполнены в виде единой системы в цельнопаяном диске из хромистой бронзы и питаются последовательно импульсом тока с амплитудой $\sim 10^6$ ампер. Подробнее конструкция магнита описана в работе [4].

В настоящее время заканчивается механическое изготовление установки, и настройка ее планируется на конец 1968 года.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ауслендер В.Л. и др. Атомная энергия, 22, 207 (1966).
2. Ландау Л.Д. I. Phys. USSR, 8, 201 (1944).
3. Стародубцев С.В., Романов А.М. Прохождение заряженных частиц через вещество, Ташкент, ИАНУССР, 1962.
4. Вечеславова Т.Е. и др. см. наст. сборник, стр. 611.

95. ПОВОРОТНО-ФОКУСИРУЮЩИЕ МАГНИТЫ С ПОЛЯМИ
100-150 кэрстед НА ЧАСТОТУ СЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСОВ В НЕСКОЛЬКО
ГЕРЦ

Т.Е. Вечеславова, Н.И. Зубков, А.В. Ильин, Г.И. Сильвестров (Институт
ядерной физики СО АН СССР)

В электронной оптике представляет интерес применение поворотных-фокусирующих магнитов малого радиуса, позволяющее выгодно сочетать в одном элементе функции поворота с короткофокусной стигматичной фокусировкой. Например, магнит с углом поворота 90° и показателем спада для $n = 0,5$ имеет в обеих плоскостях одинаковые фокусные расстояния

$$F_{r,z} = \frac{R}{\chi_{r,z} \sin \chi_{r,z} \varphi} = 1,58 R (\chi_r = \sqrt{1-n}, \chi_z = \sqrt{n}),$$

т.е. эквивалентен стигматичной линзе с фокусным расстоянием порядка радиуса.

Эти свойства поворотных-фокусирующих магнитов нашли, например, удачное применение в установке для монохроматизации позитронного пучка [1] и в блоке конверсии накопителя ВЭПП-III [2], где возникла необходимость сочетать короткофокусную светосильную фокусировку с обеспечением координатной и угловой дисперсии и поворотами электронного и позитронного пучков. Однако для получения радиуса поворота пучка порядка десяти сантиметров при энергии в несколько сотен Мэв требуются магнитные поля порядка 100 - 150 кэ.

В настоящей работе рассматривается ряд вопросов, связанных с созданием безжелезных импульсных магнитов на поля более 100 кэ, поскольку поля такого диапазона с заданными градиентами не нашли еще применения в электронной оптике и ускорительной технике.

Для формирования поля с постоянным градиентом наиболее рациональной оказывается конструкция безжелезного одновиткового магнита с профилированной по форме силовой линии шиной, по которой протекает импульсный ток с эффективной толщиной скин-слоя $\delta_{эф}$ меньше радиальной апертуры магнита ΔR . Качество формирования поля в такой системе при $\delta_{эф} \ll \Delta R$ определяется соотношением между высотой шины h и радиальной апертурой, которое обычно выбирается $h/\Delta R \sim 3 \div 4$ [3].

Было разработано два типа конструкций одновитковых магнитов, отличающихся радиусами поворота и способом механического крепления шин. Основные параметры их приведены в таблице. Магнит M_1 будет применяться для поворота и фокусировки на конвертор электронного пучка с энергией 450 Мэв в электронно-оптическом канале накопителя ВЭПП-III. Магниты M_2 и M_3 представляют собой блок конверсии накопителя ВЭПП-II: магнит M_2 фокусирует на конвертор электроны с энергией 240 Мэв, магнит M_3 собирает позитроны с энергией 120 Мэв в угле более $\pm 0,1$ радиана. На рис. 1 и 2 приведены общий вид и поперечные сечения магнитов.

Магниты питаются однополярным импульсом тока, представляющим полупериод синусоиды с длительностью по основанию 0,5 - 1 мсек, так что эффективный скин-слой составляет 2 - 3 мм и обеспечивает формирование силовых линий поля. Амплитуда импульса тока составляет $\sim 10^6$ а. Непосредственная коммутация таких токов при индуктивности нагрузки в несколько десятков сантиметров технически крайне сложна из-за отсутствия вентиля и невыгодна с точки зрения потерь на паразитных индуктивностях. Мы применяем для питания таких магнитов специально разработанные согласующие трансформаторы с малой индуктивностью рассеяния с коэффициентом трансформации $10 \div 40$ и коммутацией тока в первичной цепи сравнительно слаботочными вентилями [4].

При создании конструкций магнитов основное внимание было уделено вопросам выбора материала шин, их механического крепления, подвода тока и охлаждения.

Шины изготавливаются из хромистой бронзы БРХ-0,5, которая обладает высокой проводимостью и при оптимальном режиме закалки может иметь твердость более 100 единиц по Бринелю. Однако технология изготовления магнитов M_2 и M_3 требует пайки в вакууме серебряным припоем ПСР-72, после чего производится подкалка бронзы с нагревом до температуры 750° , обеспечивающая твердость материала лишь 55-60 единиц по Бринелю. Испытания на специальных моделях показали, что при

такой твердости бронза выдерживает сотни тысяч импульсов при давлении до 900 атмосфер ($H = 150$ кэ). Остаточные деформации на рабочей поверхности шин наступают лишь при 160 - 170 кэрт.

Основные параметры импульсных магнитов

	M_1	M_2	M_3
Равновесный радиус (см)	15	6	3
Угол поворота	90°	110°	115°
Показатель спада поля	0,5	0,5	0,5
Фокусное расстояние (см)	23,6	8,65	4,3
Энергия частиц (Мэв)	450	240	120
Максимальное поле (кэ)	100	135	135
Высота шин (см)	5	5	5
Радиальная апертура (см)	2	1	1,2
Амплитуда импульса тока (ка)	600	1000	1000
Длительность импульса тока (мсек)	0,5	0,5-1	0,5-1
Частота повторения импульсов (гц)	10	3	3
Индуктивность (мкГн)	80	25	16
Энергия магнитного поля (кдж)	15	12,5	8
Средняя мощность тепловых потерь (квт)	45	20	
Тепловой напор (вт/см^2)	180	100	100

Шины магнита M_1 изготавливаются из целькового куска бронзы без паяных стыков и переходят в широкий токоподвод с развитой контактной поверхностью в месте подсоединения к трансформатору. Соотношение между высотой шин и радиальной апертурой $h/\Delta R$ выбрано равным 2,5 и для увеличения по вертикали области рабочего поля до 1,5 см применено шиммирование (3 на рис. 1). Цилиндрические участки шин служат при этом базовыми поверхностями, по которым шины фиксируются друг относительно друга через эпостековые вкладыши (2), играющие одновременно роль вакуумных крышек. Собранные совместно с крышками шины вставляются в тороидальный эпостековый* бандаж (1) и прижимаются к его внутренней стенке пятью парами клиньев (5), каждая из которых развивает усилие более 15 тонн. Суммарное усилие, расталкивающее шины при $H = 100$ кэ, составляет 60 тонн. При поле

$H = 100$ кэ и частоте следования импульсов 10 гц тепловой напор на токовой поверхности составляет $\sim 180 \text{ вт/см}^2$, поэтому в данной конструкции принята специальная "пористая" система охлаждения: вода прогоняется поперек шины через отверстия $\phi 2,5$ мм, насверленные с шагом 5 мм на расстоянии 4,5 мм от границы токовой поверхности. Таким образом, тепло снимается практически в том же месте, где выделяется основная мощность, что сводит к минимуму перепад температуры по металлу. Из-за малости диаметра отверстий прочность шины практически не уменьшается, а длина водяного контура минимальна. Установившаяся температура поверхности шины не превышает 70° .

* В обеих конструкциях бандажи выполняются из стекловолокна, туго намотанного в определенной плоскости и залитого эпоксидной смолой под давлением 30 атмосфер.

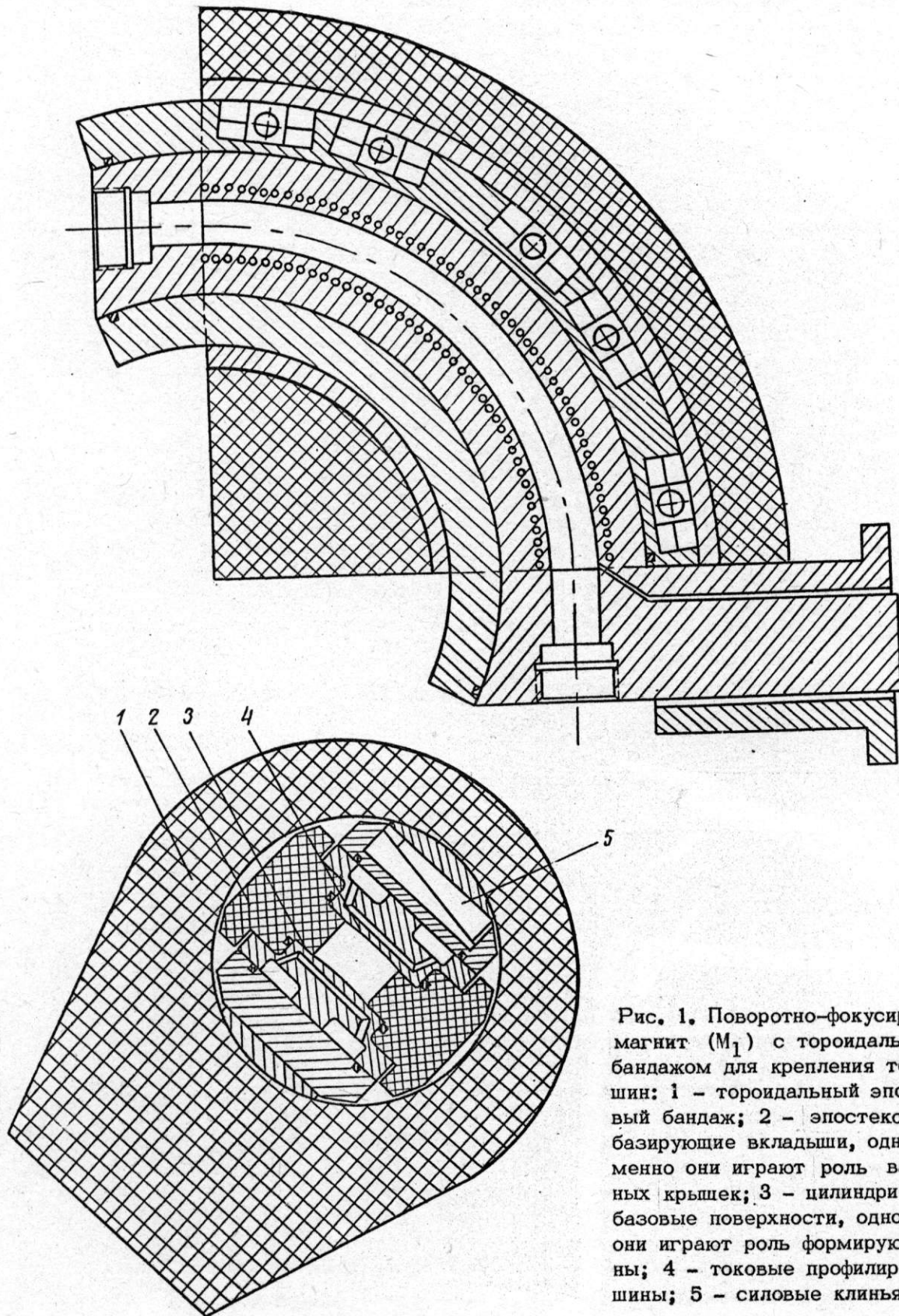


Рис. 1. Поворотно-фокусирующий магнит (M_1) с тороидальным бандажом для крепления токовых шин: 1 - тороидальный эпоксидный бандаж; 2 - эпоксидные базирующие вкладыши, одновременно они играют роль вакуумных крышек; 3 - цилиндрические базовые поверхности, одновременно они играют роль формирующих шины; 4 - токовые профилированные шины; 5 - силовые клинья

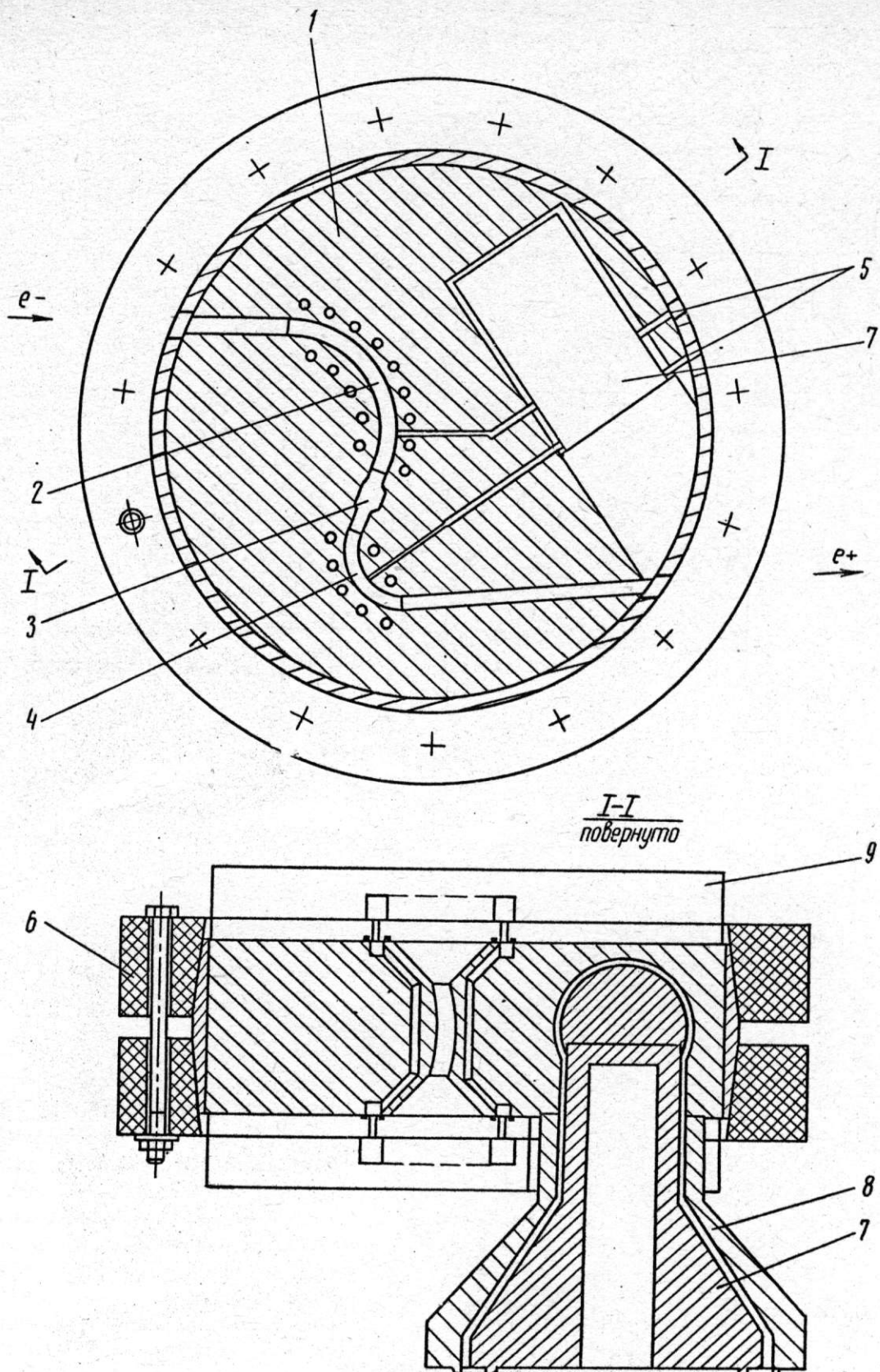


Рис. 2. Спаренные магниты блока конверсии с кольцевыми эпостекowymi бандажами: 1 - диск из БРХ-0,5; 2 - магнит M_2 , фокусирующий электроны на конвертор; 3 - конвертор; 4 - магнит M_3 , собирающий позитроны; 5 - токоподводящие разрезy; 6 - эпостековые кольцевые бандажи; 7 - 8 - тороидальный токопровод; 9 - вакуумные крышки, выполняющие одновременно роль водяных коллекторов

В магнитах M_2 и M_3 из-за малых радиусов поворота ($R_2 = 6$ см, $R_3 = 3$ см) оказалось удобнее применить иной способ бандажирования, что и определило их конструкцию. Оба магнита (рис. 2) выполнены в виде единой конструкции в цельнопаяном диске (1) из хромистой бронзы БРХ-0,5 диаметром 300 мм и толщиной 100 мм. Высота формирующей части шины составляет 50 мм. Каждый магнит имеет токоподводящий разрез (5), выходящий на край диска, что позволяет питать их независимо. Однако из соображений удобства подвода тока, механического крепления и эксплуатации единой системы питания оба магнита при помощи коаксиального токоподвода (7), сделанного в толще диска и пересекающего оба разреза, соединены последовательно.

Поскольку в данной конструкции путь для замыкания обратного магнитного потока значителен, эффективность такого магнита (соотношение между полем и током H/I) приблизительно в 1,8 раза ниже, чем в случае бесконечно высоких шин. На диск надеваются два кольцевых эпоксидных бандажа сечением 60×70 мм² с конусными поверхностями на внутреннем радиусе. При стягивании бандажей они обеспечивают равномерное радиальное сжатие диска, создавая предварительное напряжение. Суммарная сила от давления магнитного поля, разрывающая бандаж, составляет ~80 тонн. Охлаждение магнитов выполнено подобно магниту M_1 и рассчитано на частоту следования импульсов 3 гц. В этой конструкции водяные коллекторы (9) из оргстекла служат одновременно вакуумными крышками.

Многочисленные испытания на моделях позволяют ожидать, что рассмотренные конструкции при указанных полях будут выдерживать миллионы импульсов без заметного нарушения прочностных свойств.

Разработка конструкций магнитов подобного типа и опыт их эксплуатации позволит решить проблему применения импульсных магнитных полей до 150 кэ в электронной оптике при частотах повторения импульсов в несколько герц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г.И. Будкер и др. настоящий сборник, стр. 000 "Монохроматизация позитронного пучка на клинообразном замедлителе для увеличения коэффициента захвата в накопитель".
2. Т.А. Всеволожская и др. настоящий сборник, стр. 000 "Электронно-оптические каналы накопителя ВЭПП-III".
3. Г.И. Будкер и др. Международная конференция по ускорителям. Дубна, 1963 г., стр. 1065.
4. Б.Ф. Боянов и др. настоящий сборник, стр. 000 "Генератор импульсов тока с амплитудой 10^6 а".

ДИСКУССИЯ

И.М. Матора Каковы размеры сечения рабочей области?

В.Н. Пакин

Порядка сантиметра.