

A-239

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



1331/2-76

12/14-76

9 - 9363

А.И.Агеев, Н.Г.Анищенко, Н.И.Балалыкин,
Н.И.Баландиков, В.В.Бекетов, А.А.Белушкина,
Н.С.Бычков, Э.В.Волковыский, В.Я.Волков, В.В.Данилов,
Б.З.Житников, А.Г.Зельдович, Н.К.Зельдович,
Л.Л.Зиновьева, В.В.Катрасев, В.В.Крылов, В.М.Лачинов,
С.И.Лурье, Э.В.Матвеев, Х.Менке, Ю.В.Муратов,
Н.Б.Рубин, В.П.Саранцев, Ю.И.Смирнов, Г.П.Цвинева,
В.Г.Шабратов, Ю.А.Шишов

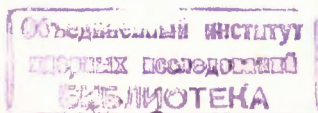
СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ И КРИОГЕННЫЕ УСТРОЙСТВА
УСКОРЯЮЩЕЙ СЕКЦИИ
КОЛЛЕКТИВНОГО УСКОРИТЕЛЯ

1975

А.И.Агеев, Н.Г.Анищенко, Н.И.Балалыкин,
Н.И.Баландикова, В.В.Бекетов, А.А.Белушкина,
Н.С.Бычков, Э.В.Волковыский, В.Я.Волков, В.В.Данилов,
Б.З.Житников, А.Г.Зельдович, Н.К.Зельдович,
Л.Л.Зиновьева, В.В.Катрасев, В.В.Крылов, В.М.Лачинов,
С.И.Лурье, Э.В.Матвеев, Х.Менке, Ю.В.Муратов,
Н.Б.Рубин, В.П.Саранцев, Ю.И.Смирнов, Г.П.Цвинева,
В.Г.Шабратов, Ю.А.Шишов

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ И КРИОГЕННЫЕ УСТРОЙСТВА
УСКОРЯЮЩЕЙ СЕКЦИИ
КОЛЛЕКТИВНОГО УСКОРИТЕЛЯ

Направлено в ЖТФ



Агеев А.И. и др.

9 - 9363

Сверхпроводящие и криогенные устройства ускоряющей секции
коллективного ускорителя

Приводится обоснование выбора сверхпроводящих элементов (резонаторов, соленоидов) ускоряющей секции коллективного ускорителя (кольцепетрона) и дано описание этих элементов. Рассмотрены особенности рефрижераторной системы охлаждения узлов кольцепетрона. Приведены данные о требуемой структуре магнитного поля и используемой системе магнитометрии.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований
Дубна 1975

1. Введение

В Объединенном институте ядерных исследований в течение нескольких лет ведутся работы по созданию ускоряющих систем коллективного ускорителя ионов^{/1,2/}, в том числе криогенной высокочастотной секции /установка "Кольцепетрон"^{/3,4/}/. Завершены основные монтажные работы на кольцепетроне; в настоящее время проводятся поузловые и комплексные испытания и с учетом результатов этих испытаний - модернизация отдельных элементов.

В кольцепетроне создается пилообразное магнитное поле с максимальным значением $B_0 = 2 \text{ Т}$ и $5 \pm 10\%$ -ной модуляцией /рис. 1/. На участках нарастания /по z / магнитного поля расположены цилиндрические резонаторы с отверстиями по оси для прохода ускоряемых сгустков частиц. В резонаторах возбуждается высокочастотное электромагнитное поле с продольным компонентом электрического поля. Резонаторы предназначены для ускорения электронных сгустков, удерживающих внутри себя некоторое количество ионов - конечных объектов ускорения*. Электронный сгусток представляет собой кольцо вращающихся электронов,двигающееся и ускоряемое резонаторами вдоль оси вращения. Продольное ста-

* Каждый ион, удерживаемый кулоновскими силами внутри электронного сгустка и ускоряемый вместе со сгустком, должен приобретать энергию, большую, чем любой из электронов, во столько раз, во сколько раз масса покоя иона больше "эффективной" массы покоя электрона^{/1,2/}. В этом идея коллективного метода ускорения.

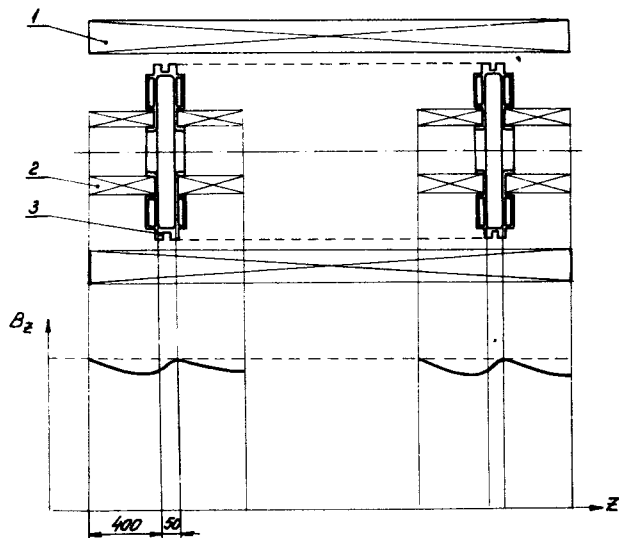


Рис. 1. Картина распределения магнитного поля в кольцевом циклотроне /размеры указаны в мм/. Над графиком $B_z(z)$ схематически показаны сверхпроводящие соленоиды и резонаторы: 1 - соленоид СПС-600, 2 - градиентные соленоиды, 3 - резонаторы с гелиевыми ваннами.

ционарное магнитное поле необходимо для поддержания вращательного движения электронов. Пространственная модуляция магнитного поля /глубина которой задается в зависимости от выбора параметров электронных колец/ позволяет регулировать соотношение между поступательным импульсом и вращательным моментом кольца. Благодаря этому, обеспечивается определенная "плавность" продольного ускорения сгустков.

Основные элементы секции - сверхпроводящие соленоиды, сверхпроводящие резонаторы и системы холодообеспечения /криогенные системы/. Длина секции ~ 3 м, ожидаемая энергия ускоренных протонов ~ 400 МэВ.

2. Сверхпроводящие резонаторы

Секция содержит 4 сверхпроводящих резонатора цилиндрического типа / $f = 500$ МГц/. Рабочей поверх-

ностью резонаторов является тонкая пленка из сверхпроводника 2-го рода, нанесенная на две симметричные медные половинки каждого резонатора /рис. 2,3/. Применение сверхпроводника 2-го, а не 1-го рода обусловлено тем, что резонаторы кольцевитрона находятся во внешнем магнитном поле 2Т. Нанесение пленки произ-

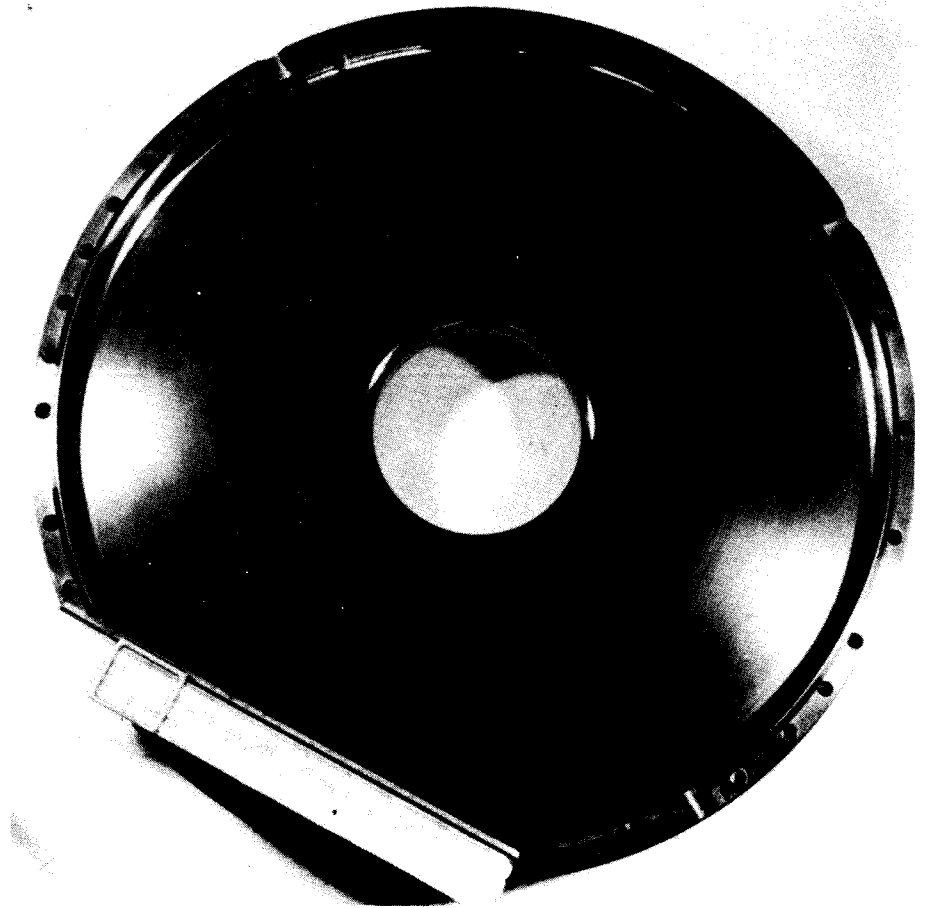


Рис. 2. Половина цилиндрического резонатора с ниобий-титановой пленкой.



Рис. 3. Резонаторно-модульный узел кольцетрона. На переднем плане - два резонатора в сборке с двумя модулями. Выступающий вперед полый цилиндр - криостат с заключенным в нем градиентным соленоидом. Медные пластины, охватывающие модули и расположенные между резонаторами, обеспечивают механическую жесткость резонаторно-модульного узла. На заднем плане - кольцетрон с криостатом СПС-600, подготовленный для вкатывания собранного резонаторно-модульного узла.

водится в камере напыления^{/5/} при вакууме 10^{-7} Тор. Скорость конденсации - $0,3$ мкм/мин. В настоящее время применяется покрытие из Nb-Ti, в дальнейшем предполагается использование покрытий из других материалов.

На основании оценок, сделанных с помощью двухжидкостной модели для сплава Nb-Ti-50, приведенное значение поверхностного сопротивления в отсутствие внешнего магнитного поля получается равным $2 \cdot 10^{-7}$ на частоте 500 МГц. Соответствующие значения фактора улучшения добротности /по отношению к тепловому резонатору/ равны $2 \div 5 \cdot 10^5$.

Наличие постоянного магнитного поля, существенно превышающего критическое поле H_{c1} , должно увеличить поверхностное сопротивление R_s , поэтому данный случай потребовал проведения специальных исследований.

Использование сверхпроводящих резонаторов в секции обусловлено тем, что даже при добротностях резонаторов $Q \sim 10^7 \div 10^8$ значительно снижается импульсная мощность питающих генераторов Q^{-1} , т.е. значительно упрощается и удешевляется система ВЧ питания. Но при указанных добротностях тепловые потери в резонаторах еще достаточно велики, что вынуждает работать в импульсном режиме /интервал времени между поступающими последовательно ускоряемыми электронными кольцами $\tau = 5$ с/. Наиболее благоприятный случай, когда $Q > 10^9$, т.к. тогда возможен переход на непрерывный режим работы резонаторов / $\tau = 0,01$ с/.

3. Сверхпроводящие соленоиды

Магнитное поле кольцетрона создается сверхпроводящими цилиндрическими соленоидами. Основной соленоид /СПС-600/, охватывающий резонаторы, имеет внутренний диаметр 60 см, длину 240 см и создает в центре поле напряженностью $2T$ /см. табл. 1/. Требуемая однородность поля на радиусе 5 см составляет $0,15\%$. Для намотки соленоида использована шина длиной 3 км, сечением $5 \times 2,5$ мм²/см. табл. 2/. Обмотка содержит четыре

Таблица 1
Основные параметры сверхпроводящего соленоида СПС-600 и корректирующих катушек СПС-170

	СПС-600	СПС-170
Магнитное поле в центре B_0 [Т]	2	0+0,23
Внутренний диаметр обмотки (см)	59,6	17
Наружный диаметр (см)	62,4	20,2+20,8
Длина (см)	235,2	1,65
Рабочий ток (А)	2440	0+50
Плотность тока в обмотке (А/см ²)	$1,14 \cdot 10^4$	$0+1,3 \cdot 10^4$
Запасенная энергия (Дж)	$1,06 \cdot 10^6$	175
Индуктивность (Гн)	0,357	0,14
Максимальная запасенная энергия (при 2,75 кА) (Дж)	$1,35 \cdot 10^6$	-

Таблица 2
Параметры шины и провода, использованного при намотке СПС-600 и СПС-170

	СПС-600	СПС-170
Размеры сечения (мм)	5 x 2,5	60,5
Материал сверхпроводника	ниобий-титан	ниобий-50% титана
Материал матрицы	медь	медь
Диаметр жилы (мкм)	60	65
Количество жил	1500	19
Отношение сечений меди и сверхпроводника	2 : 1	3 : 1
Шаг скрутки жил (мм)	35	30
Отношение удельных сопротивлений меди ρ_{300K} / ρ_{10K}	135	36
Вид изоляции	Два слоя стекловолокна в эпоксиде	Обмотка лавсановым волокном в два слоя
Электрическая прочность изоляции в жидком гелии (кВ)	1,6	-
Размер сечения с изоляцией (мм)	5,3 x 2,8	60,62+0,69

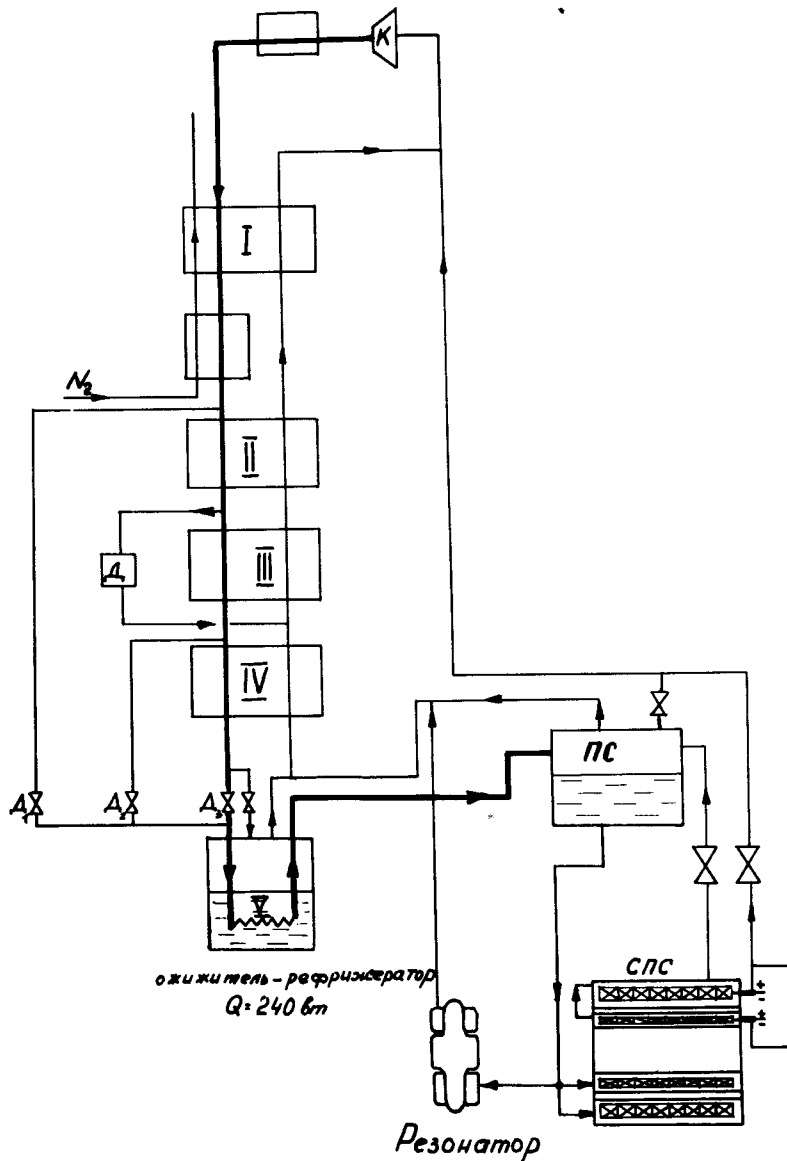


Рис. 4. Принципиальная схема системы криостатирования кольцетрона.

слоя шин, изолированных друг от друга и от каркаса несколькими слоями лавсановой пленки.

Для создания специальной "градиентной" конфигурации магнитного поля /см. рис. 1/ между резонаторами размещены 6 групп соленоидов. Каждая группа /модуль/ содержит 16 катушек с внутренним диаметром 17 см /см. табл. 1/. Катушки навиты из провода диаметром 0,5 мм /см. табл. 2/. Провод изолирован двумя слоями лавсановой нити, между слоями обмотки размещено по нескольку слоев лавсановой пленки. Длина провода в одной катушке равна 400 м. Все 96 катушек обеспечены независимым питанием, которое подводится через шесть комплексных токовых вводов.

4. Охлаждение и криостатирование кольцетрона

Система криостатирования кольцетрона кратко описана в^{/4/}. Принципиальная схема, по которой кольцетрон работал до настоящего времени, представлена на рис. 4. Гелий сжимается до 30 ат компрессором К производительностью 1200 м³/час и подается в детандерный ожижитель холодопроизводительностью 240 Вт /в рефрижераторном режиме/. Вентили D₁ и D₂ служат для ускорения процесса охлаждения. Подробно работа ожижителя в различных режимах рассмотрена в^{/6/}. Жидкий гелий транспортируется в промежуточный сосуд /ПС/, из которого самотеком поступает в нижние точки криостатов с соленоидами СПС и в резонатор. Газообразный гелий при температуре 4,5К возвращается частично в ожижитель, частично идет на охлаждение токовых вводов соленоидов.

5. Системы электропитания и эвакуации энергии

Принципиальная электрическая схема рассматриваемых систем приведена на рис. 5. Было предусмотрено два источника питания для СПС-600 и шесть шестнадцатиканальных - для СПС-170.

Указанная точность установки тока обеспечивается применением в опорных источниках многооборотных потенциометров.

Предусмотрено два способа эвакуации энергии из СПС-600:

1/ коммутация тока осуществляется автоматическим выключателем типа АВ45-1/6000, а поглощение энергии - активным сопротивлением $R_2 = 0,2 \text{ Ом}$;

2/ функции коммутатора тока и поглотителя энергии совмещены в одном аппарате-автомате гашения поля АГПм, снабженном быстродействующим индукционно-динамическим приводом^{/8/} и дугогасительной решеткой с 16 промежутками.

Следует отметить, что при эвакуации на АГПм величина напряжения эвакуации (U_3) может изменяться за счет включения в работу различного числа промежутков дугогасительной решетки АГПм.

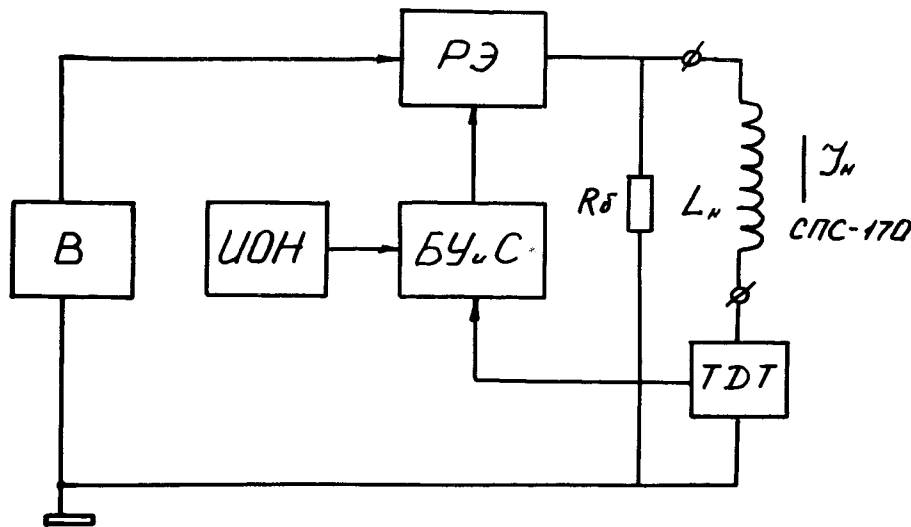


Рис. 6. Функциональная схема источников ИП-16-100. В - выпрямитель, РЭ - регулируемый элемент, ИОН - источник опорного напряжения, БУС - блок управления и стабилизации, ТДТ - термостабилизированный датчик тока, R_6 - балластное сопротивление.

В качестве датчика срыва в схеме защиты СПС-600 предполагается использовать блок, собранный по схеме "мостика" /рис. 5/.

Защита катушек СПС-170 осуществляется постоянно подключенными к их концам активными сопротивлениями $R_3 = 0,3 \text{ Ом}$, защита СИТ от перенапряжений со стороны СПС-600 при эвакуациях энергии - с помощью цепи от силовых диодов и активного сопротивления $R_1 = 0,004 \text{ Ом}$.

На рис. 5 степень магнитной связи СПС-600 с различными контурами, в том числе с СПС-170, условно обозначена расчетными^{/9/}, стр. 290/ коэффициентами взаимной индукции /М/. С учетом этих коэффициентов были произведены расчеты на ЭВМ переходных процессов в основных магнитно-связанных с СПС-600 контурах, происходящих при эвакуации энергии. Цель расчетов - определение величин токов, механических усилий, температур нагрева и долей энергии, выделяемых в отдельных контурах, в основном обладающих высокой электропроводностью. Основные допущения, принятые в расчетах: в течение всего переходного процесса отсутствует теплоотдача от рассматриваемых контуров в жидкий гелий; не учитывается теплообмен между расчетными контурами; нормальная зона /при расчете режимов со срывом сверхпроводящего состояния соленоида/ распространяется мгновенно по всей длине обмотки; плотность тока по сечению всех рассматриваемых контуров одинакова.

Алгоритм расчета представляет собой решение системы дифференциальных уравнений, выраженных для рассматриваемых контуров через элементы обратной матрицы определителя, составленного из величин индуктивностей и взаимной индукции контуров. Система уравнений решается относительно токов контуров методом Рунге-Кутты, затем определяются тепловыделения и приросты температуры контуров в конце каждого из выбранных интервалов времени.

На рис. 7 приведены результаты расчета на ЭВМ переходных процессов при эвакуации энергии из СПС-600 на $R_2 = 0,2 \text{ Ом}$ и на АГПм при начальном токе $I_0 = 2,5 \text{ кА}$ /без срыва сверхпроводящего состояния со-

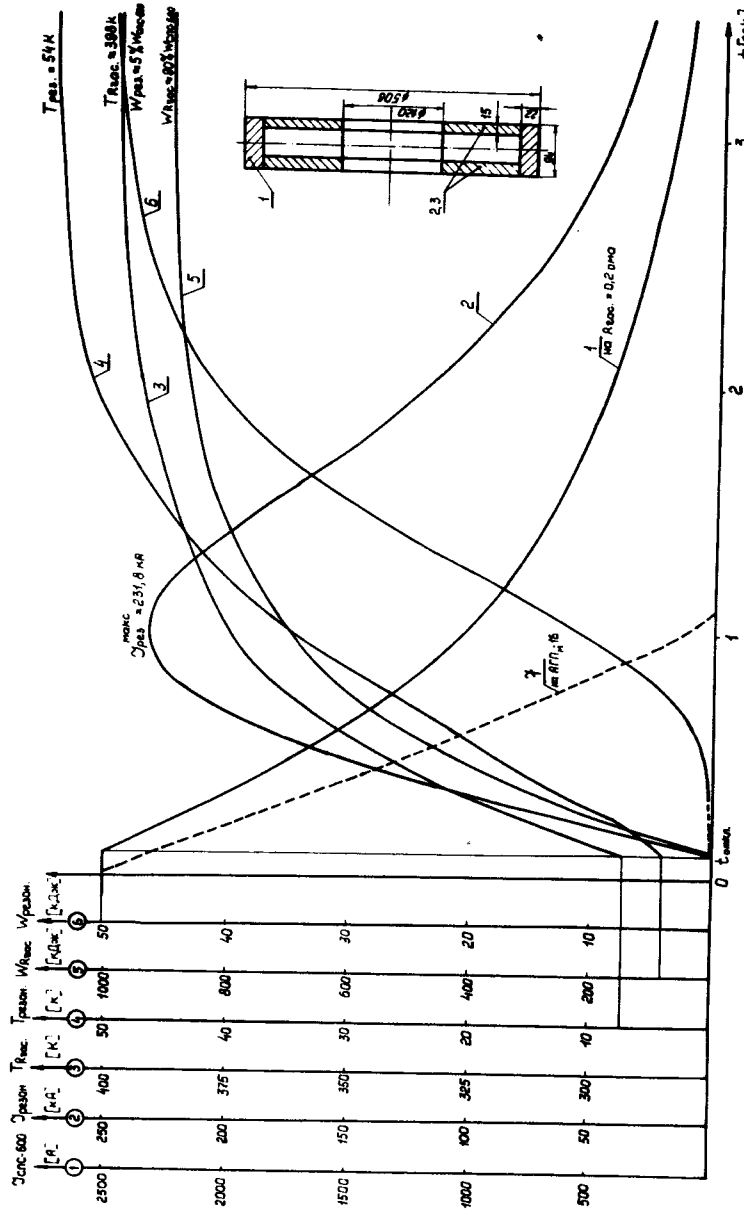


Рис. 7. Расчетные кривые переходных процессов при эвакуации энергии из СПС-600 с учетом двух медных резонаторов.

леноида/. Расчетный вариант магнитной системы содержал, кроме обмотки СПС-600, еще два массивных медных кольца, соответствующих цилиндрическим частям двух резонаторов /поз. 1 на эскизе рис. 7/. Сплошные кривые - зависимости от времени соответственно тока в обмотке СПС /1/, тока в каждом из резонаторных колец /2/, изменения температуры внешнего сопротивления $R_2/3/$ и резонаторных колец /4/, а также энергии, выделившейся в $R_2/5/$ и каждом из резонаторных колец /6/. Пунктирная кривая /7/ - расчетное изменение тока в обмотке СПС-600 при эвакуации энергии с помощью автомата гашения поля АГПм-16 /при одинаковых начальных условиях с предыдущим расчетным режимом/. В обоих случаях принято, что максимальное напряжение на концах соленоида не должно превышать 600 В, причем при эвакуации на АГПм-16 напряжение на концах соленоида в течение всего переходного процесса $U_3 \approx \text{Const}$. За счет этого значительно уменьшается продолжительность процесса эвакуации: так, расчетное время эвакуации /до $I = 0,1 I_0$ / при $I_0 = 2,5$ кА на АГПм-16 составляет 0,95 с, а на $R_0 = 0,2$ Ом равно 2,7 с.

6. Расчет и методика измерения магнитного поля кольцетрона

Для конструктивно выбранных конфигураций обмоток и заданной топографии магнитного поля рассчитывались токи в основном и градиентном соленоидах /4,10/. При этом решалась так называемая обратная задача магнитостатики. Для проверки точности расчета по найденным значениям токов вновь находилось магнитное поле.

Ниже приводятся основные формулы для расчета поля по заданному в соленоиде СПС-600 значению тока. Схематическое изображение магнитной системы соленоида СПС-600 представлено на рис. 8.

Секции, показанные на рис. 8, составляют единый соленоид, наматываемый одной шиной; промежутки между секциями используются для размещения высокочастотных вводов в резонаторы. Искажение магнитного поля несущественно. Провалы магнитного поля от соленоида

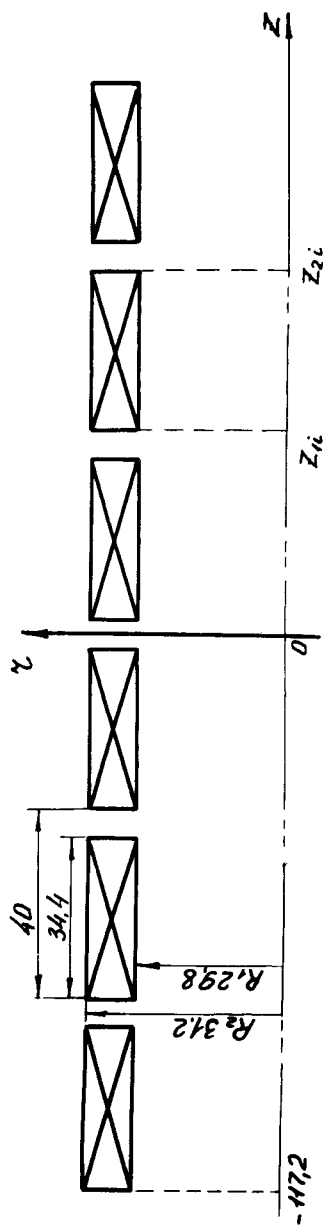


Рис. 8. Схема магнитной системы соленоида СПС-600.

СПС-600 из-за промежутка между секциями подлежат компенсации с помощью градиентных соленоидов; это второе назначение градиентных соленоидов /помимо создания заданной пространственной модуляции поля/.

Теоретические значения полей в соответствующих точках рассчитывались на ЭВМ. При этом поле в точке с координатами r, z определялось по формуле

$$B_z(r, z) = j \sum_{i=1}^N \int_{Z_{1i}}^{Z_{2i}} \int_{R_{1i}}^{R_{2i}} G_z(r, z, r', z') dr' dz', \quad /1/$$

где N - число секций в соленоиде; j - плотность тока в соленоиде;

$$j = \frac{I w_c}{S}. \quad /2/$$

I - ток от источника; w_c - число витков в одной секции соленоида; S - площадь поперечного сечения одной секции; r', z' ; r, z - координаты соответственно токонесущей и расчетной точек; Z_{1i} ; Z_{2i} ; R_{1i} ; R_{2i} - соответственно продольные и радиальные границы i -ой секции /см. рис. 8/; $G_z(r, z, r', z')$ - функция Грина, которая для продольной составляющей поля в аксиально-симметричной системе имеет вид ^{/11/}

$$G_z(r, z, r', z') = \frac{k}{\sqrt{(r'+r)^2 + (z'-z)^2}} \left[K + \frac{r'^2 - r^2 - (z'-z)^2}{(r'-r)^2 + (z'-z)^2} E \right], \quad /3/$$

где K и E - соответственно полные эллиптические интегралы первого и второго рода от модуля x ,

$$x^2 = \frac{4rr'}{(r'+r)^2 + (z'-z)^2}, \quad /4/$$

k - коэффициент, зависящий от системы единиц, для системы СИ величина $k = 2 \cdot 10^{-5}$.

Измерения магнитных полей проводились многоканальным холловским магнитометром, пробник с датчиком Холла располагался в специальной головке, которая была теплоизолирована от корпуса криостата СПС-600. Кроме того, что пробник имел индивидуальную систему

термостабилизации, с наружной стороны он обдувался потоком воздуха комнатной температуры. С помощью моторного привода головка могла перемещаться вдоль оси соленоида от одного его края до другого. Используемый датчик Холла располагался на расстоянии ~ 3 см от оси соленоида и мог поворачиваться на 360° . Изменялась z -составляющая магнитного поля соленоида.

В магнитометре были использованы датчики Холла из антимонида индия ^{12/}, которые имеют размер чувствительной области $1,6 \times 0,5 \times 0,13$ мм³ чувствительностью 10^2 мВ/Т при номинальном токе питания 100 мА, температурный коэффициент напряжения э.д.с. Холла $0,01\%/K$ и линейность характеристики $0,1\%$ в диапазоне полей до $2,5$ Т. Результаты измерения регистрировались с помощью цифрового вольтметра, точность которого лучше $0,01\%$, и печатались на бумажной ленте.

Магнитометр позволяет после предварительного прогрева проводить измерения магнитных полей в диапазоне до $2,5$ Т с относительной точностью лучше $0,02\%$. Абсолютные значения поля определяются с точностью $0,1\%$, либо более точно по градуировочным кривым.

Литература

1. В.И. Векслер и др. АЭ, 24, 317 /1968/.
2. А.Г. Бонч-Осмоловский и др. Препринт ОИЯИ, Р9-4171, Дубна, 1968.
3. Н.Г. Анищенко и др. Препринт ОИЯИ, Р9-4722, Дубна, 1969.
4. Н.Г. Анищенко и др. Препринт ОИЯИ, Р9-5488, Дубна, 1970.
5. Н.И. Балалыкин и др. Препринт ОИЯИ, Р8-6855, Дубна, 1972.
6. Н.Н. Агапов и др. Препринт ОИЯИ, Р8-8850, Дубна, 1975.
7. Н.С. Бычков и др. Препринт ОИЯИ, Р13-8066, Дубна, 1974.
8. А.И. Блудов и др. Быстродействующий возвратно-поступательный механизм с электромагнитным ускорением и торможением якоря. ПТЭ, №4, стр. 241 /1973/.

9. П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. Расчет индуктивностей. Изд. Энергия, Ленинград, 1970.
10. Е.П. Жидков и др. Препринт ОИЯИ, Р9-7580, Дубна, 1973.
11. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Электродинамика сплошных сред. Физматгиз, М., 1959.
12. В.И. Погодин, Г.А. Юрьева. Датчик Холла из антимонида индия. Приборы и системы управления, 7, 15 /1972/.
13. З.Д. Стекли, Р.Д. Тоум. Применение сверхпроводящих обмоток в крупных установках и системах. ТИИЭР, том. 61, №1, стр. 104, Изд. Мир, М., 1973.

Рукопись поступила в издательский отдел
3 декабря 1975 года.