

## СИСТЕМА ПИТАНИЯ МАГНИТА БЕЗЖЕЛЕЗНОГО СИНХРОТРОНА БСБ

А. А. Лившиц, А. Б. Нелидов, И. М. Самойлов и А. А. Соколов

Дано описание системы питания магнита импульсного синхротрона БСБ [1]. Система формирует в индуктивной нагрузке  $\sim 350$  см; импульс тока специальной формы с временем нарастания около 1.5 мсек. и максимальным значением тока до  $10^6$  а.

Для одновиткового безжелезного синхротрона БСБ [1] характерным является малая индуктивность магнита (350 см без учета потока в скин-слое) и большой ток возбуждения (магнитное поле на орбите в 13.5 кэ достигается при токе возбуждения  $\sim 10^6$  а). Эти два обстоятельства в значительной мере осложняют разработку элементов схемы питания. Необходимо обеспечить, с одной стороны, минимальную индуктивность „фидера“, подводящего к магниту ток, с другой стороны, „фидер“ должен обладать достаточной механической жесткостью и малым активным сопротивлением. При токе возбуждения  $\sim 10^6$  а и длительности импульса тока  $\sim 1$  мсек. появляются также трудности при разработке коммутирующего разрядника, так как рабочие поверхности его электродов быстро разрушаются.

В синхротроне БСБ в качестве источника питания магнита используется конденсаторная батарея суммарной емкостью 0.045 ф (300 шт. конденсаторов ИМ 5/150), которая при максимальном рабочем напряжении 5 кв обладает запасом энергии в 0.56 Мдж. В нашем случае оказалось целесообразным питать магнит синхротрона от батареи через импульсный трансформатор с коэффициентом трансформации по току 10. По сравнению со случаем прямого разряда батареи на магнит этот вариант имеет следующие преимущества. Во-первых, используя имеющуюся высоковольтную конденсаторную батарею, можно существенно удлинить цикл ускорения, уменьшив соответственно ускоряющее напряжение на резонаторе. Это обстоятельство в нашем случае оказалось весьма важным, так как с учетом требований максимальной компактности и „прозрачности“ резонатора для импульсных магнитных полей попытка получения высокого напряжения (20—30 кв) на резонаторе при наличии частотной модуляции встретила с серьезными трудностями. Во-вторых, применение импульсного трансформатора снижает величину коммутируемого тока, что заметно упрощает разработку соответствующего разрядника. И, наконец, поскольку батарею таких размеров нельзя разместить непосредственно вблизи ускорителя, то применение импульсного трансформатора (при условии размещения его в непосредственной близости от ускорителя) позволяет без существенных энергетических потерь увеличить расстояние между ускорителем и конденсаторной батареей. Разумеется, все эти преимущества оправданы лишь в том случае, если индуктивность рассеяния трансформатора меньше индуктивности магнита, а активные потери в системе питания за время ускорения не превышают активных потерь за время ускорения при прямом разряде батареи на магнит.

При использовании трансформатора проблема механических усилий, отсутствующая в магните ускорителя [1], вновь возникает в трансфор-



маторе. Однако, поскольку он является элементом, вынесенным за пределы ускорителя, имеются широкие конструктивные возможности для того, чтобы обеспечить его необходимую механическую и электрическую прочность.

### Основной контур

Система питания магнита состоит из двух независимых схем — основной и вспомогательной. С помощью вспомогательной схемы осуществляется ускорение до 3 Мэв, а основная схема, использующая основную конденсаторную батарею, включается только при ускорении до более высоких энергий.

Основная конденсаторная батарея разделена на две секции, заряжаемые до  $+5$  и  $-5$  кв (рис. 1). Обе секции с помощью вакуумного

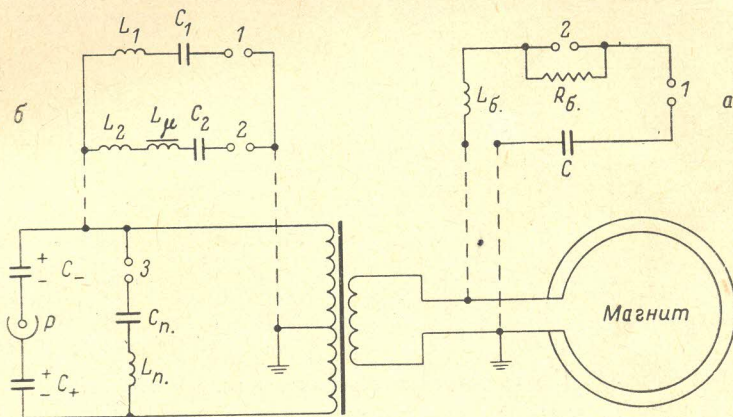


Рис. 1. Электрическая схема питания магнита.

$C_+ = C_- = 2.25 \cdot 10^{-2}$  ф  $\times$  5 кв;  $C_{п.} = 150$  мкф;  $L_{п.} = 10^{-2}$  гн. а и б — варианты вспомогательной схемы питания;  $C_1 = 150$  мкф,  $C_2 = 1150$  мкф;  $L_1 = 3 \cdot 10^{-4}$ ,  $L_2 = 4 \cdot 10^{-6}$ ,  $L_{\mu} \approx 10^{-3}$  гн.

разрядника  $P$  коммутируются последовательно на первичную обмотку трансформатора, вторичная обмотка которого нагружена на магнит ускорителя. Каждая из секций батареи составлена из двух сдвоенных рядов конденсаторов по 75 шт. Сдвоенные ряды позволяют более рационально выполнить экранированную малоиндуктивную сборную ошиновку рядов (рис. 2); (ошиновка такого типа часто применяется в установках для термоядерных исследований). Показанная на рис. 2 конструкция ошиновки позволяет использовать ее и без дополнительных перемычек 3, как это обычно принято. Однако, как показал опыт работы, использование перемычек заметно упрощает сборку конденсаторной батареи с ошиновкой и замену отдельных конденсаторов. Существенна возможность использования этих перемычек в качестве „предохранителей“. Запас механической прочности перемычек может быть выбран так, чтобы они разрывались электродинамическими силами, возникающими при пробое одного из конденсаторов. (При имевших место в нашем случае пробоях отдельных конденсаторов каждый раз происходил обрыв перемычки с автоматическим отключением пробитого конденсатора).

Сборные шины четырех рядов конденсаторов соединяются в общую сборную ошиновку. Все участки цепи, включающей первичную обмотку трансформатора, выполнены либо в виде плоских „коаксиалов“, либо в виде двухпроводных линий малой индуктивности, что, в частности, сводит до минимума величины рассеянных магнитных полей.



Импульсный трансформатор имеет О-образный прямоугольный сердечник, собранный из листов трансформаторной стали толщиной 0,35 мм. Сечение сердечника  $600 \text{ см}^2$ . Первичная обмотка, имеющая 40 витков, выполнена медной шиной  $0,6 \times 4 \text{ см}^2$ . Обмотка разбита на две секции по 20 витков (рис. 3, б). Каркасом секции служит стальной цилиндр 11, толщиной 1,2 см (имеющий разрез по образующей), на который надевается винипластовый цилиндр 15 толщиной 1,5 см с канавкой для намотки витков обмотки 16. Зазор между цилиндрами 11 и 15 заливается эпоксидной смолой, слой 14. После намотки витков они заливаются слоем эпоксидной смолы и дополнительно изолируются тонкостенной (3 мм) винипластовой трубой 17, которая в собранном трансформаторе непосредственно граничит с внутренней поверхностью витков

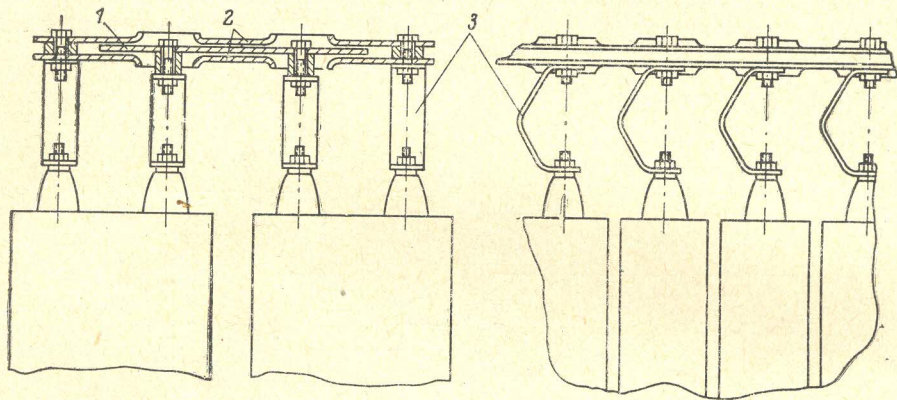


Рис. 2. Схема устройства ошиновки конденсаторов.

1 — потенциальная шина сечением  $2 \times 400 \text{ мм}^2$ ; 2 — экранящие шины сечением  $1,5 \times 600 \text{ мм}^2$ ; 3 — медные перемычки сечением  $0,5 \times 30 \text{ мм}^2$ .

вторичной обмотки. В схеме коммутации секций первичной обмотки трансформатора используются металлические каркасы секций, к которым присоединены нижние концы половин обмотки (рис. 3, в), что позволяет свести к минимуму поля рассеяния от первичной обмотки.

Вторичная обмотка (рис. 3, а) имеет четыре массивных витка 1—4 высотой 50 см, диаметром 44 см, выполненных из меди, толщиной 1,2 см. Витки соединены последовательно с помощью массивных медных шин, как показано на рис. 3, а. Для создания механической прочности коммутационные шины 5—9 стянуты между собой болтами равномерно по всей площади с расстоянием между соседними болтами 8 см. Индуктивность рассеяния трансформатора, приведенная ко вторичной обмотке, по измерениям на частоте 270 кГц составляет около 170 см.

Подвод тока от трансформатора к магниту ускорителя осуществляется с помощью плоского малоиндуктивного „коаксиала“ („фидера“) 10 (рис. 3, а), шириной 50, длиной 300 см. Центральная медная шина „фидера“ имеет сечение  $0,6 \times 40 \text{ см}^2$ , равное сечению двух внешних шин. По усилиям вторичной обмотки и „фидер“ рассчитаны на ток  $10^6 \text{ а}$ . Обе обмотки и „фидер“ могут охлаждаться водой. Вес трансформатора 2,5 т.

При токах во вторичной обмотке выше 500 ка трансформатор работает с подмагничиванием. Цепь подмагничивания состоит из емкости  $C_{\text{п}}$ , заряжаемой от отдельного выпрямителя, индуктивности  $L_{\text{п}}$  и разрядника З (рис. 1), который замыкает эту цепь на первичную обмотку трансформатора. Основной контур замыкается разрядником Р в максимуме тока подмагничивания.



Электрические параметры основного разрядного контура (с основной конденсаторной батареей) следующие: емкость  $11.25 \times 10^{-3} \text{ ф} \times 10 \text{ кв}$ ; индуктивность и сопротивление, приведенные к вторичной обмотке:

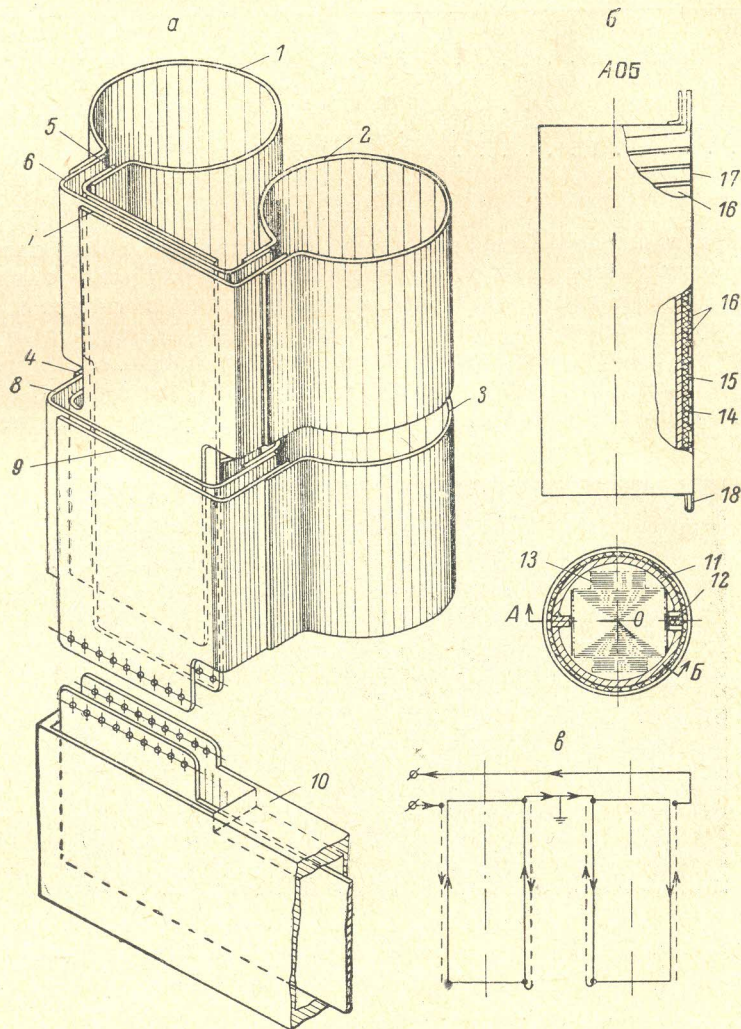


Рис. 3. Схема конструкции импульсного трансформатора.

*a* — схема устройства вторичной обмотки: 1—4 — витки обмотки; зазор по вертикали между витками 1—3 и 2—4 равен 3.5 см; 5—9 — коммутационные шины, толщина 1 см; *б* — схема устройства секции первичной обмотки: 12 — изоляционная прокладка по всей длине образующей цилиндра, 11, 13 — контуры сечения сердечника, 18 — перемычка между секцией первичной обмотки и цилиндром 11 (см. *в*); *в* — схема протекания тока в цепи первичной обмотки.

670 см и  $3 \cdot 10^{-4}$  ом; добротность контура 2.7. Активные потери уменьшают максимальное значение разрядного тока примерно на 20%. Распределение индуктивности и активного сопротивления по отдельным участкам контура приведено в таблице. Данные получены в рабочем режиме, точность измерений  $\sim 20\%$ .

### Вспомогательная схема питания

В синхротроне БСБ по ряду причин (главным образом для обеспечения квазипостоянного поля в момент инжекции и удлинения предварительного этапа ускорения до 3 Мэв, связанного с модуляцией ча-



Участок контура	Индуктивность, см	Распределение магнитной энергии, %	Сопротивление $\cdot 10^{-4}$ ом	Распределение активных потерь, %
До трансформатора . . . . .	3,000	4	80	26
Трансформатор (приведенный ко вторичной обмотке) . . . . .	180	27	1.1	37
От трансформатора до магнита . . . . .	70	11	} 1.1	37
Магнит . . . . .	390	58		

стоты ВЧ напряжения) выгодно иметь специальный закон нарастания ведущего магнитного поля  $H$  во времени (см. [1]). Грубо говоря, ток в магните должен быть составлен из трех отрезков синусоид различных амплитуд и периодов (рис. 4). Такой закон изменения  $H$  удобно получать, используя вспомогательные схемы питания. В варианте рис. 1, *a* используется дополнительная батарея  $C$ , которая с помощью разрядника  $I$  через балластную индуктивность  $L_0$  и сопротивление  $R_0$ .

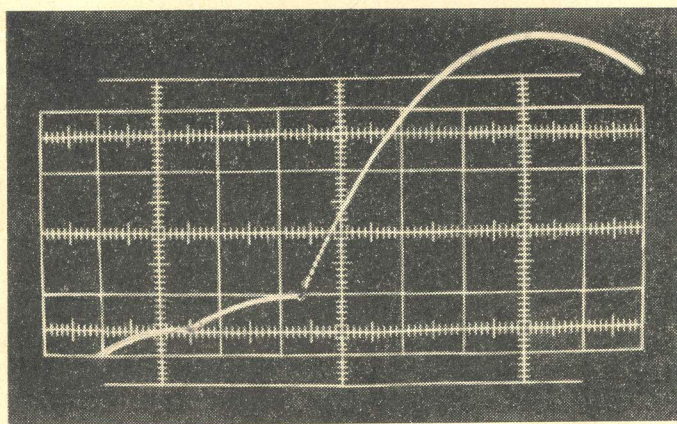


Рис. 4. Импульс магнитного поля ускорителя. Развертка — большое деление, равное 250 мксек.

разряжается на магнит ускорителя. Через несколько микросекунд после достижения током максимума сопротивление закорачивается разрядником 2 и поле снова возрастает. Этот вариант позволяет обойтись одной батареей (и одним выпрямителем) и уменьшает время от момента включения поля до момента инжекции при медленном спаде поля после инжекции, что, с одной стороны, уменьшает возможное влияние на инжектируемый пучок проникающего во входной канал магнитного поля, а с другой стороны, позволяет, отодвинув момент включения второго разрядника, достаточно долго (десятки микросекунд) наблюдать поведение захваченного в квазибетатронный режим тока. Коммутация осуществляется разрядниками с графитовыми электродами и принудительным воздушным охлаждением. В варианте рис. 1, *a*:  $L_0 = 20$  мкГн,  $C = 1150$  мкФ  $\times 5$  кв,  $R_0 = 0.6$  ом (сопротивление намотано из нихромовой проволоки  $\varnothing 1.8$  мм и охлаждается проточной водой); максимальный ток 20 ка.

Для гашения паразитных переходных процессов, возникающих в системе питания при включении разрядников, используется сопротивление, равное  $\sim 0.1$  ом, подключенное через малоиндуктивную емкость



10 мкф параллельно вторичной обмотке трансформатора. Для устранения перенапряжений на первичной обмотке трансформатора она также зашунтирована сопротивлением, подключенным через емкость. Эти цепи на рис. 1 не показаны.

Был испытан также вариант рис. 1, б вспомогательной схемы питания, при котором поле инжекции и поле, соответствующее ускорению до 3 Мэв, обеспечиваются последовательным разрядом на первичную обмотку трансформатора двух небольших конденсаторных батарей  $C_1$  и  $C_2$ , включенных последовательно с индуктивностями  $L_1$  и  $L_2$ . По сравнению с вариантом а такая схема позволяет в широких пределах изменять скорость нарастания магнитного поля  $\dot{H}_n$  в начале цикла ускорения при неизменном поле инжекции. Для дополнительного уменьшения  $\dot{H}_n$  используется насыщающаяся индуктивность  $L_n$  с железным сердечником.

Осциллограмма поля при полном цикле ускорения (конечная энергия  $\sim 15$  Мэв) дана на рис. 4.

Частота повторения рабочих импульсов схемы питания определяется мощностью выпрямителей, заряжающих основную конденсаторную батарею. При токе в магните  $\sim 0.7 \cdot 10^6$  а, соответствующем рабочей энергии синхротрона БСБ 130 Мэв, частота повторения при имеющейся мощности выпрямителей  $2 \times 10$  квт один раз в 30 сек. (зарядка батарей осуществляется через активное сопротивление). Частота повторения импульсов может быть увеличена примерно на порядок при использовании предусмотренного водяного охлаждения элементов схемы питания и магнита при соответствующем увеличении мощности заряжающих выпрямителей.

Заметим, что длительных испытаний основного разрядного контура при токе  $10^6$  а не проводилось. После нескольких тысяч импульсов с током  $0.5 \div 1 \cdot 10^6$  а в сильноточном контуре не было обнаружено заметных деформаций, ослабления и обгорания контактов. Накопленный к настоящему времени опыт работы с описанной выше схемой питания показывает, что использование для возбуждения магнита синусоидальных импульсов тока до  $10^6$  а при времени нарастания порядка миллисекунды не вызывает каких-либо серьезных технических затруднений. Следует отметить, что при выборе схемы питания учитывались специфические требования, обусловленные удобством использования ее для наладки машины и проведения связанных с запуском экспериментов, что требует применения дополнительных высоковольтных источников, без которых можно обойтись при работе ускорителя на фиксированной энергии электронов.

В заключение авторы выражают благодарность Г. И. Будкеру и А. А. Наумову за внимание и советы, а также Г. С. Морозову, М. Я. Рогутскому, Г. Т. Цикину, Е. В. Шунько за участие в разработке отдельных элементов системы питания.

#### Литература

[1] Г. И. Будкер, П. И. Медведев, Ю. А. Мостовой, О. А. Неженко, А. Б. Нелидов, Г. Н. Острейко, В. С. Панасюк, И. М. Самойлов и А. А. Соколов. ЖТФ, наст. вып., стр. 1523.

Поступило в Редакцию  
27 сентября 1965 г.