

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

A 465

9-88-258

**В.С.Александров, Л.В.Дубовик, А.В.Рашевский,
А.Е.Черемухин, А.С.Щеулин**

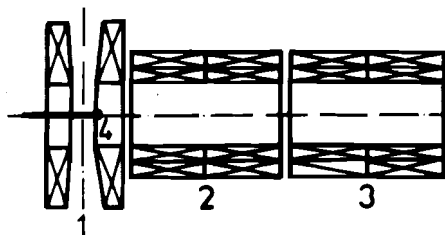
**О ДОПУСКАХ НА ПАРАМЕТРЫ
ВЫВОДНОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ КУТИ-20**

1988

Выводная магнитная система (ВМС) адгезатора КУТИ-20^{1/1} реализует тот же способ вывода электронно-ионного кольца из режима сжатия в ускорительный тракт, что и ВМС ПКУТИ^{2/2}. При этом кольцо смещается из медианной плоскости камеры адгезатора в магнитной потенциальной яме, передний барьер которой уменьшается до нуля. Далее происходит ускорение сгустка в градиентном магнитном поле за счет перевода части энергии азимутального движения в энергию аксиального.

Определяющим параметром ускоряющей системы является величина относительного градиента магнитной индукции $\frac{1}{B_z} \frac{\partial \bar{B}_z}{\partial z}$ (черта означает усреднение по площади кольца). В соленоидах адгезатора КУТИ-20 за счет применения катушки с переменным шагом^{3/3} реализован градиент $2 \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-1}$ при оптимальных соотношениях токов в катушках ВМС (рис. 1). При нарушении этих соотношений локальные градиенты (в местах "стыков" полей отдельных катушек) могут значительно превышать приведенное значение. В настоящей работе предлагается способ настройки ВМС, минимизирующий локальные градиенты, и оцениваются допуски на отклонения ее параметров от номинальных. Приводятся также результаты экспериментальной проверки предлагаемой методики настройки.

Рис. 1. Схема выводной и ускоряющей магнитной системы адгезатора КУТИ-20: 1 – оконечная ступень сжатия; 2, 3 – градиентные соленоиды; 4 – синхровиток.



1. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И ПРИНЦИП РАБОТЫ ВМС КУТИ-20

Динамика вывода электронно-ионного кольца определяется, в основном, параметрами катушек оконечной ступени сжатия и первого градиентного соленоида (в дальнейшем соленоид-1), собственно и составляющих ВМС. Влияние синхровитка (4, рис. 1) на формирова-

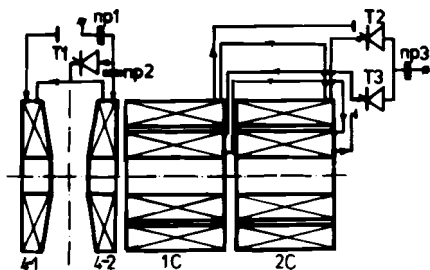


Рис. 2. ВМС адгезатора КУТИ-20.

ние градиента несущественно. На рис. 2 представлена ВМС адгезатора КУТИ-20 с некоторыми элементами схемы питания. Разбиение соленоида-1 по длине на две секции обусловлено необходимостью уменьшения разности потенциалов ΔU в местах токоподводов до значений ниже предела по электрической прочности. В приведенной схеме ΔU нигде не превышает $U/2$, где U — напряжение на накопительной емкости, разряд которой формирует рабочий импульс тока. Кроме того, соленоид-1 имеет две двухслойные радиальные секции, запитываемые через отдельные коммутаторы Т2 и Т3 аналогично схеме, применявшейся на ПКУТИ^{1/2/}.

Типичные осциллограммы токов в катушках ВМС представлены на рис. 3. До включения тока соленоида (t_c) происходит формирование и сжатие электронного кольца в магнитной потенциальной яме, симметричной относительно медианной плоскости камеры. При $t_c < t < t_w$ кольцо незначительно смещается в сторону, противоположную направлению ускорения. До t_w токи в шунтируемой (4-2, рис. 2) и нешунтируемой 4-1 катушках изменяются одинаково. После срабатывания коммутатора Т1 при $t = t_w$ катушка 4-2 отсекается от накопительной емкости системы питания, и ток в ней уменьшается благодаря индуктивной связи с катушкой 4-1 и соленоидом-1. Скорость нарастания и амплитуда тока в нешунтируемой катушке увеличиваются в соответствии с уменьшением волнового сопротивления контура. Это вызывает медленное (по сравнению с периодом обращения электронов) смещение магнитной потенциальной ямы в направлении ускорения и снижения потенциального барьера. Момент времени $t_{выв}$ снятия барьера (начало ускорения) из энергетических соображений выбирается вблизи максимумов токов в обмотке 4-1 и соленоиде-1. Все эти процессы, т.е. снятие магнитной ямы и освобождение электронно-ионного кольца для последующего ускорения происходят в области $z \leq 15$ см от медианной плоскости камеры.

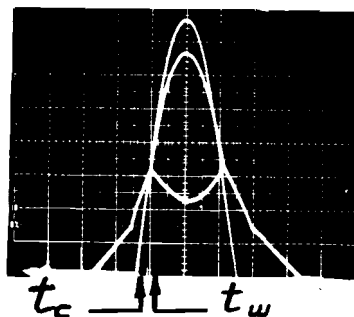


Рис. 3. Осциллограммы токов в катушках ВМС в порядке возрастания амплитуд: J_w , $J_{нш}$, $2J_c$.

2. СТАТИЧЕСКИЕ ДИАГРАММЫ. ДОПУСКИ НА СООТНОШЕНИЯ ТОКОВ В КАТУШКАХ ВМС

Условие снятия потенциального барьера $\frac{\partial B_R}{\partial z} = 0$ (B_R — радиальная компонента магнитной индукции), определяемое в точке нахождения центра масс кольца, т.е. там где $B_R(R_k, z_k) = 0$, можно представить в виде

$$\frac{J_w}{J_{нш}} = - \frac{\partial G_{нш}}{\partial z} / \frac{\partial G_w}{\partial z} - \frac{\partial G_{c1}}{\partial z} / \frac{\partial G_w}{\partial z} \frac{J_{c1}}{J_{нш}}, \quad (1)$$

Здесь J_w , $J_{нш}$, J_{c1} — токи в шунтируемой и нешунтируемой катушках оконечной ступени сжатия и соленоиде-1 соответственно; $\frac{\partial G_i}{\partial z} = \frac{1}{J_i} \times \frac{\partial B_{Ri}}{\partial z}$; R_k, z_k — радиус и аксиальная координата центра масс кольца.

Важной особенностью выражения (1) является отсутствие в явном виде временных параметров (длительностей импульсов, времен включений и т.д.). Поэтому геометрическое место точек на плоскости $(\frac{J_{c1}}{J_{нш}}, \frac{J_w}{J_{нш}})$, описываемое (1), будем называть статической диаграммой ВМС.

Численное моделирование показало, что при фиксированной геометрии ВМС существуют две узкие в аксиальном направлении области выполнимости условия (1), отличающиеся знаком $\frac{\partial |G_{c1}|}{\partial z}$. При $\frac{\partial |G_{c1}|}{\partial z} > 0$, т.е. на нарастающем участке распределения радиальной составляющей краевого магнитного поля соленоида, снятие магнитного барьера происходит в области $z = 6 \div 7$ см (I режим). В обратном случае $\frac{\partial |G_{c1}|}{\partial z} < 0$ кольцо начинает ускоряться в градиентном поле, начиная с $z = 13 \div 14$ см (II режим). При этом внутри каждой области все величины практически не зависят от аксиальной координаты. Поэтому на статической диаграмме для каждого радиуса кольца мы получили две линии, слабо отличающиеся от прямых и описывающие I и II режимы работы ВМС^{1/4/}. На рис. 4 приведены результаты численных расчетов статических диаграмм вывода. При их построении в качестве тока соленоида бралось его удвоенное значение, т.к. на практике обычно измеряется суммарный ток обеих радиальных ветвей поясом Роговского ПРЗ (рис. 2). Кривые 1, 2, 3 соответствуют I режиму, 4 — II

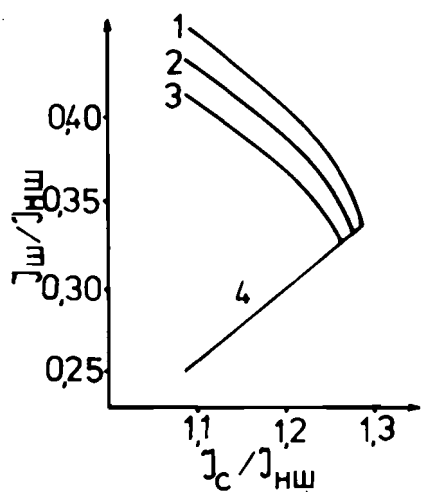


Рис. 4. Статические диаграммы вывода: 1 – $R = 3,5$ см; 2 – $R = 4,0$ см; 3 – $R = 4,5$ см; 4 – II режим.

режиму. Последний, будучи привлекательным с точки зрения минимальных локальных градиентов магнитной индукции, для практических целей оказывается непригодным. Это связано с тем, что в этом режиме при движении кольца в магнитной яме в области $z = 6 \div 7$ см барьер локально снимается и положение центра масс оказывается неопределенным как в аксиальном, так и в радиальном направлениях

(неопределенность по радиусу связана с близостью к целому резонансу $\nu_R = 1$ при снятии барьера^{/2/}). На рис. 5 приведены распределения относительного градиента магнитной индукции для различных рабочих точек на статической диаграмме. Кривая 2 соответствует II режиму. Видно, что при выполнении условия перехода кольца в режим ускорения в точке $z = 14,5$ см ($\frac{1}{B_z} \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0$) в области $z = 7$ см локальный градиент также близок к нулю. Это и характеризует неопределенность положения центра масс кольца, особенно с учетом нестабильностей токов в катушках ВМС.

Кривые 1 и 3 относятся к I режиму и отличаются выбором точки на диаграмме. Для кривой 1 имеем:

$$\frac{J_{ш}}{J_{нш}} = 0,332, \quad \frac{J_{с1}}{J_{нш}} = 1,274;$$

для кривой 3: $\frac{J_{нш}}{J_{нш}} = 0,356,$

$$\frac{J_{с1}}{J_{нш}} = 1,276.$$

Видно, что по мере удаления от вершины диаграммы ($\frac{J_{ш}}{J_{нш}} = 0,33; \frac{J_{с1}}{J_{нш}} = 1,28$) возрастают локальные

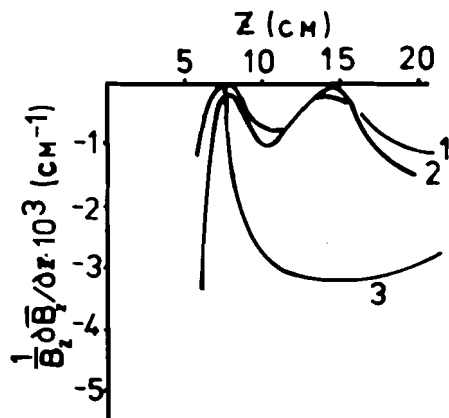


Рис. 5. Распределения относительного градиента магнитной индукции на начальном участке ускорения.

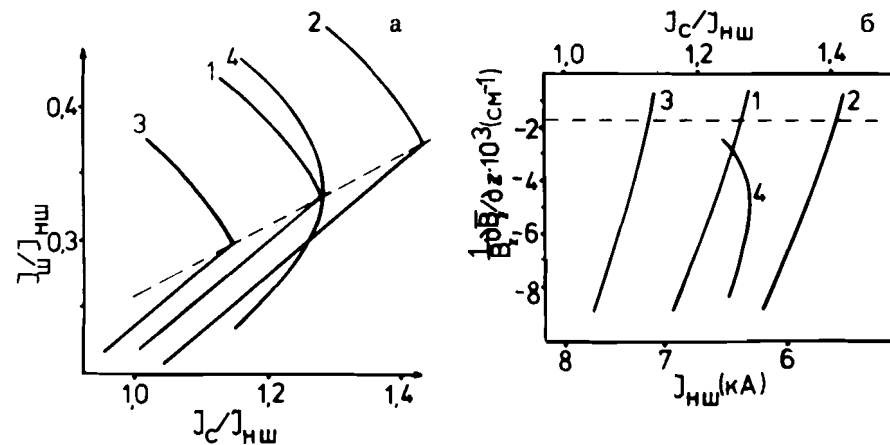


Рис. 6. Статические диаграммы (а) и максимальные градиенты (б), достигаемые в переходной зоне: 1 – проектное положение катушек; 2, 3 – нешунтируемая катушка сдвинута на $\pm 0,5$ см; 4 – расстояние между шунтируемой катушкой и соленоидом увеличено на $0,5$ см.

градиенты. Отсюда следует, что, измерив статическую диаграмму, можно, с одной стороны, оптимальным образом выбирать рабочую точку, с другой, при таком подходе нетрудно сформулировать требования на точность установки катушек в аксиальном направлении и на стабильность токов в катушках ВМС. На рис. 6а,б приведены расчетные статические диаграммы для различных взаимных положений обмоток и соответствующие зависимости максимальных локальных градиентов в переходной зоне $z \leq 20$ см. Пунктир на рис. 6б соответствует максимальному значению величины $\frac{1}{B_z} \frac{\partial B_z}{\partial z}$ в тракте ускорения при

оптимальных соотношениях токов. Из всей совокупности приведенных данных следует, что допуск на аксиальное положение катушки не является жестким, за исключением взаимного расстояния между соленоидом и шунтируемой катушкой (допуск $\leq \pm 0,5$ мм). Под допуском понимается условие непревышения локальным градиентом величины $2 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ (т.е. максимального значения на участке ускорения). Исходя из этого же критерия нетрудно получить допуски на стабильность токов:

$$\frac{\Delta J_{с1}}{J_{с1}} = \frac{\Delta J_{нш}}{J_{нш}} \leq 4 \cdot 10^{-3}.$$

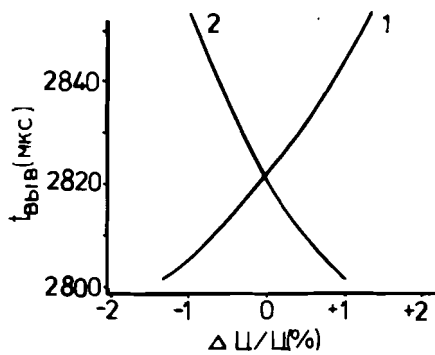


Рис. 7. Влияние отклонений зарядных напряжений накопительных емкостей систем питания соленоида (1) и 4-й ступени (2) на $t_{\text{выв}}$.

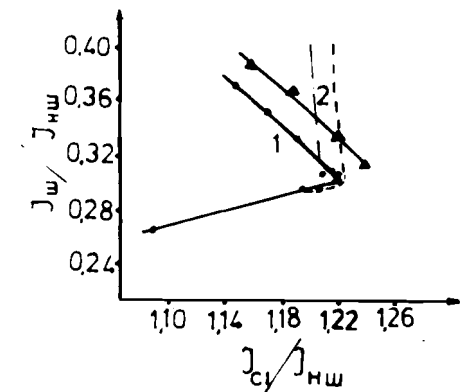
При оптимальном выборе времени шунтирования $t_{\text{ш}}$ допуски на токи эквивалентны требованиям на стабильность зарядных напряжений соответствующих зарядных емкостей.

Нестабильность токов в катушках ВМС и энергии инжектируемого электронного пучка приводит к тому, что условие (1) реализуется в разные моменты времени. Этот эффект иллюстрируется рис. 7. Видно, что при изменении напряжения $(\Delta U / U) = \pm 10^{-2}$ время вывода меняется на $\pm 15 \div 25$ мкс. Если учесть, что для дальнейшего ускорения электрон-ионного кольца применяется ЛИУ с коротким (~ 70 нс) импульсом напряжения, допустимый временной разброс не должен превышать $\Delta t_{\text{доп}} = \pm 5$ нс, то получаются практически нереализуемые требования на стабильность по отношению к нескоррелированным уходам зарядных напряжений $(\Delta U / U) \approx \pm 3 \cdot 10^{-6}$. Для ослабления этих требований применяется дополнительный синхровиток (4, рис.1), представляющий собой одновитковую катушку с радиусом, меньшим радиуса электронно-ионного кольца^{1/1}. Ток, протекающий в этой катушке, создает дополнительный магнитный барьер, который быстро снимается в момент времени $t = t_{\text{выв}} + 20$ мкс (когда яма, образованная катушками ВМС, уже снялась). При этом требования на стабильность токов ВМС с точки зрения временного разброса снижаются в $\sim k = t_{\phi} \omega_{c1}$ раз, где ω_{c1} — эффективная круговая частота изменения токов в соленоиде или нешунтируемой катушке; t_{ϕ} — время снятия дополнительного барьера. Для параметров адгезатора КУТИ-20 $\omega_{c1} \approx 3 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ и $t_{\phi} = 10^{-7} \text{ с}$ $\Delta t_{\text{доп}} = \pm 5$ нс допускается $(\Delta U / U) \approx 10^{-2}$, что слабее требований на этот параметр с точки зрения минимальных градиентов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА СТАТИЧЕСКИХ ДИАГРАММ

Для экспериментальной проверки статических диаграмм токи в соленоиде-1 и обеих катушках оконечной ступени сжатия измерялись с помощью трех АЦП, имеющих относительную погрешность $\pm 5 \cdot 10^{-4}$.

Рис. 8. Измеренные статические диаграммы: 1 — $E_{\text{инж}} = 2,4$ МэВ; 2 — $E_{\text{инж}} = 1,7$ МэВ.



Измерения производились в момент сброса кольца на мишень в конце участка ускорения. Факт сброса определялся по сигналу ФЭУ, регистрирующего вспышку тормозного излучения при разрушении кольца. Основную погрешность вносил временной разброс моментов начала ускорения, что приводило к относительной ошибке измерения токов $3 \cdot 10^{-3}$, а соответствующих отношений $(\frac{J_{c1}}{J_{нш}} \text{ и } \frac{J_{ш}}{J_{нш}}) - 6 \cdot 10^{-3}$. При применении синхровитка эта погрешность уменьшалась до уровня погрешности АЦП.

На рис. 8 представлены измеренные* статические диаграммы для двух энергий инжекции $E_{\text{инж}} = 2,4$ МэВ и $E_{\text{инж}} = 1,7$ МэВ (т.е. для разных конечных радиусов). Видно, что вид диаграммы и ее изменение при варьировании радиуса кольца удовлетворительно согласуются с расчетом. Некоторое смещение вершины от расчетного положения не является опасным, поскольку сохранение формы свидетельствует о том, что наиболее критичное с точки зрения локальных градиентов расстояние между шунтируемой катушкой и соленоидом выдержано с достаточной точностью.

Интересным является поведение "траектории" кольца на плоскости $(\frac{J_{c1}}{J_{нш}}, \frac{J_{ш}}{J_{нш}})$, иллюстрирующее изменение отношений токов в моменты времени, предшествующие выводу. Экспериментальные траектории для I и II режимов вывода также приведены на рис. 8. Точка пересечения траектории с диаграммой соответствует моменту вывода. Заметим, что траектория во II режиме проходит очень близко к вершине диаграммы, что соответствует локальному снятию барье-

Аналогичная попытка была предпринята на ПКУТИ с контролем за величиной градиентов по аксиальной скорости кольца^{1/5}. Однако большая погрешность ($\sim 10\%$) фиксации токов в катушках ВМС не позволила провести проверку схемы настройки режима.

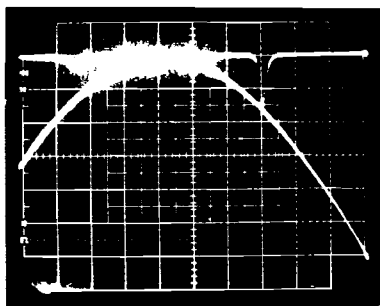


Рис. 9. Сигнал тормозного излучения при выводе во II режиме и ток соленоида.

ра в районе $z = 7$ см. Экспериментально в этот момент времени наблюдаются потери частиц из кольца (см. рис. 9), отсутствующие в I режиме.

ВЫВОДЫ

1. Предложена схема настройки ВМС адгезатора КУТИ-20, основанная на использовании статических диаграмм режимов вывода электронно-ионных колец.

2. Показано, что, во избежание возникновения больших локальных градиентов, необходимо стабилизировать токи в катушках ВМС с точностью не хуже $\pm 4 \cdot 10^{-3}$.

3. Получено удовлетворительное согласие расчетных диаграмм с экспериментально измеренными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров В.С. и др. ОИЯИ, 9-83-613, Дубна, 1983.
2. Странцев В.П., Перельштейн Э.А. Коллективное ускорение ионов электронными кольцами. М.; Атомиздат, 1979.
3. Александров В.С. и др. ОИЯИ, 9-86-157, Дубна, 1986.
4. Александров В.С. и др. ОИЯИ, P9-11663, Дубна, 1978.
5. Александров В.С. и др. ОИЯИ, P9-83-862, Дубна, 1983.

Рукопись поступила в издательский отдел
21 апреля 1988 года.

Александров В.С. и др.

9-88-258

О допусках на параметры выводной магнитной системы КУТИ-20

При отклонении параметров выводной магнитной системы адгезатора коллективного ускорителя с электронными кольцами от номинальных возможно увеличение локальных градиентов магнитного поля до значений, превосходящих максимально допустимые. В работе рассчитаны соответствующие допуски. Показано, что относительные отклонения токов не должны превышать $\pm 4 \cdot 10^{-3}$. Предложен и экспериментально проверен способ настройки выводной магнитной системы с помощью диаграмм отношений токов в катушках.

Работа выполнена в Общеинститутском научно-методическом отделении ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1988

Перевод авторов

Alexandrov V.S. et al.

9-88-258

About Allowances on the Parameters of the KUTI-20 Withdrawal Magnetic System

Increasing of magnetic field local gradients over the maximum permitted values is possible at the deflection of withdrawal magnetic system parameters in the compressor of the collective electron rings accelerator out of nominal ones. Corresponding allowances are calculated in the investigation. It is shown that relative deflections have not to be over $\pm 4 \cdot 10^{-3}$. The manner of the withdrawal magnetic system correction by means of diagrams with coils currents proportions has been suggested and tested experimentally.

The investigation has been performed at the Scientific-Methodical Division of High Energy Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1988