

СЗУ5Л1
Г-121

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



24/41-74

P9 - 8353

4914/2-44

И.Габанец, Х.Гурач, В.М.Жабицкий, И.Н.Иванов,
А.М.Каминская, А.К.Каминский, В.И.Миронов,
В.П.Рашевский, В.П.Саранцев, А.П.Сергеев,
С.Г.Стеценко, С.И.Тютюнников, В.П.Фартушный

МАГНИТНАЯ СИСТЕМА АДГЕЗАТОРА
МОДЕЛИ КОЛЛЕКТИВНОГО УСКОРТЕЛЯ

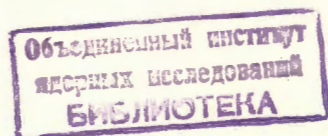
1974

ОТДЕЛ НОВЫХ МЕТОДОВ УСКОРЕНИЯ

Р9 - 8353

И.Габанец, Х.Гурач, В.М.Жабицкий, И.Н.Иванов,
А.М.Каминская, А.К.Каминский, В.И.Миронов,
В.П.Рашевский, В.П.Саранцев, А.П.Сергеев,
С.Г.Стеценко, С.И.Тютюнников, В.П.Фартушный

МАГНИТНАЯ СИСТЕМА АДГЕЗАТОРА
МОДЕЛИ КОЛЛЕКТИВНОГО УСКОРИТЕЛЯ



Габанец И., Гурач Х., Жабицкий В.М., Иванов И.Н., Р9 - 8353
Каминская А.М., Каминский А.К., Миронов В.И.,
Рашевский В.П., Саранцев В.П., Сергеев А.П.,
Стеценко С.Г., Тютюнников С.И., Фаргушный В.П.

Магнитная система адгезатора модели коллективного ускорителя

В работе приведены основные параметры магнитной системы адгезатора модели коллективного ускорителя ОНМУ ОИЯИ. Изложена методика формирования спадающего магнитного поля на стыке адгезатора и переходного участка. Рассмотрены основные пути модернизации системы инжекции в адгезаторе.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований
Дубна, 1974

Gabanets I., Gurach H., Zhabitsky V.M., Р9 - 8353
Ivanov I.N., Kaminskaya A.M. et al.

The Magnetic System of a Compressor for
a Collective Accelerator Model

The main parameters are presented of the magnetic system of a compressor for the model of a collective accelerator of the Department of New Methods of Acceleration (JINR). The procedure is described of formation of the decreasing magnetic field on the junction of the compressor and the transition region. The main ways of modernization of the injection system in the compressor are considered.

Communications of the Joint Institute for Nuclear Research.
Dubna, 1974

В адгезаторе модели коллективного ускорителя ионов ОНМУ ОИЯИ были проведены основные эксперименты по формированию, сжатию и предварительному ускорению электронного кольца, нагруженного ионами /1/. Конструктивно адгезатор представляет собой изготовленную из нержавеющей стали вакуумную камеру, в которой расположены одновитковые катушки, создающие импульсное магнитное поле. В последнее время магнитная система сжатия неоднократно модернизировалась и в настоящее время состоит из следующих узлов:

1. Система инжекции - постоянное магнитное поле и переменное поле I ступени сжатия /так называемое быстрое поле/.

2. Система компрессии - переменные магнитные поля II и III ступеней сжатия, обеспечивающие минимальный радиус кольца в медианной плоскости приблизительно 4,5 см.

3. Система компенсации искажения магнитного поля на стыке адгезатора и переходного участка.

Основные параметры трех ступеней сжатия и катушек постоянного поля приведены в табл. 1. Расположение витков выбиралось из условия обеспечения фокусировки ($0 < n < 1$) и нежелательности прохождения резонанса $n=0,5$ на всех этапах сжатия. Для расчетов используется программа, позволяющая знать все параметры кольца и внешнего поля в зависимости от начальных условий. Кроме того, в программе определяется число накопленных ионов из остаточного газа в камере адгезатора в зависимости от давления газа и параметров электрон-

Наименование	Геометрическое расположение (R - средний радиус витка в см, Z - расстояние от медяной плоскости в см)	Способ формирования тока, максимальный ток, коммутатор
I ступень (быстрое поле)	$R_1 = 47$ $R_2 = 41$ $Z_1 = 7$ $Z_2 = 11,5$	RC - разряд, 5кА, ТТУ-5000/50
II ступень	$R = 42$ $Z = 23$	LC - разряд, 50 кА, разрядник
III ступень	$R_1 = 20$ $R_2 = 15,5$ $R_3 = 15,5$ $Z_1 = 13$ $Z_2 = 26,3$ $Z_3 = 35,3$	LC - разряд, 300 кА, разрядник

ного кольца ^{2/}. R- и n-траектории для выбранной системы сжатия приведены на рис. 1. В расчетах учтено экранирующее действие камеры адгезатора как идеально проводящего экрана. Магнитные измерения показали хорошее соответствие эксперимента и расчета для распределения магнитного поля по радиусу каждой из ступеней сжатия /см., напр., рис. 2/.

Все витки изготовлены из медных шин. Конструкция крепления витков и токовых подводов в основном определяется их способностью выдерживать возникающие при прохождении тока в витках механические нагрузки, особенно существенные для витков III ступени сжатия. Необходимость малости азимутальных искажений магнитного поля токовыми подводами в области существования пучка приводит к дополнительным требованиям на конструкцию и расположение подводов. Общий вид токовых

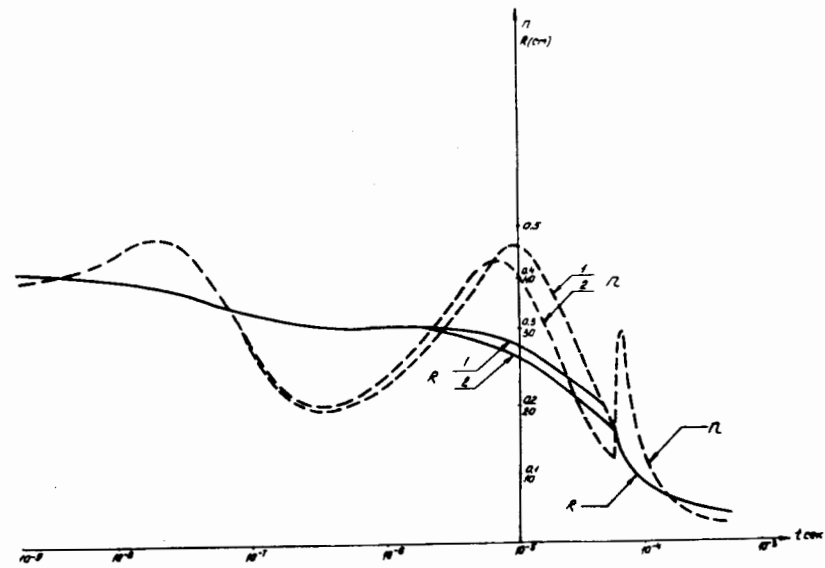


Рис. 1. R- и n-траектории. Максимальный ток в витках II ступени - 30 кА /кривая 1/ и 50 кА /кривая 2/.

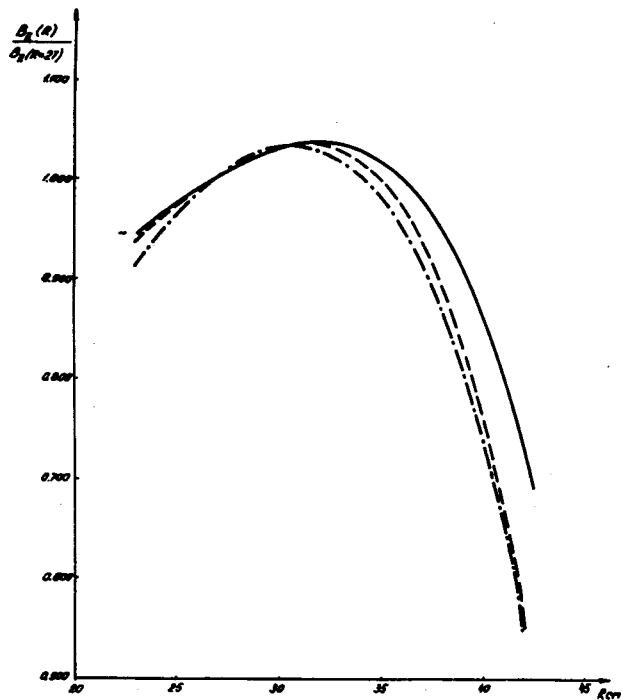


Рис. 2. Распределение магнитного поля по радиусу.
 ———— - теоретическая кривая без учета экранирования;
 - - - - - теоретическая кривая с учетом экранирования;
 - · - · - · - результаты измерений.

витков показан на рис. 3. На этом же рисунке виден корректирующий виток /протяженный в аксиальном направлении и включенный последовательно с III ступенью сжатия/, служащий для компенсации искажения переменного магнитного поля металлической стенкой на стыке адгезатора и переходного участка.

Вывод кольца осуществляется посредством снятия магнитного барьера и создания спадающего в аксиальном направлении магнитного поля ^{1/3}. Это достигается нарушением симметрии распределения магнитного поля относительно медленной плоскости в результате закорачивания /шунтировки/ половины витков III ступени сжатия

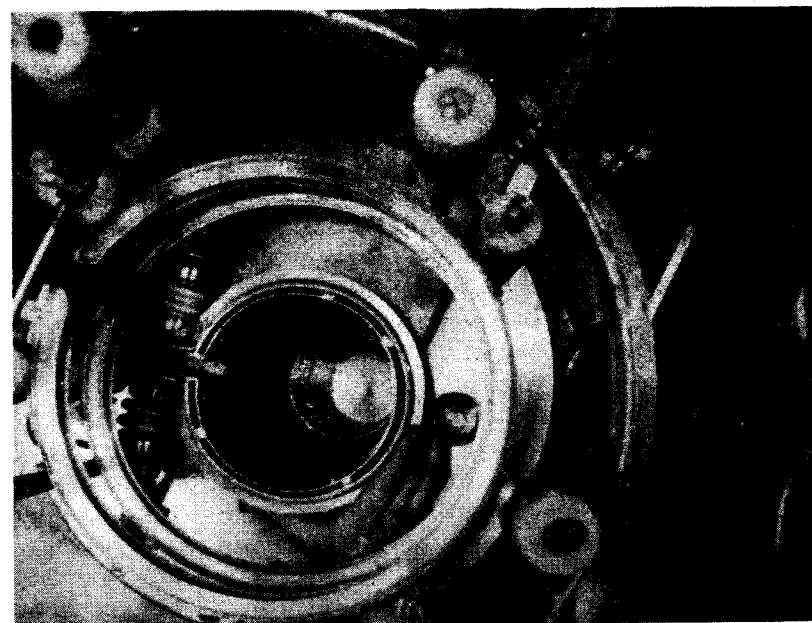


Рис. 3. Общий вид конструкции и расположения витков в адгезаторе.

со стороны корректирующего витка. В шунтированной половине витков величина тока практически не меняется за время снятия магнитного барьера и вывода кольца. В нешунтированной половине ток продолжает нарастать. Параметры III ступени сжатия подобраны таким образом, чтобы выводной уровень определялся шунтированными витками и формировался в основном раньше, чем снимается барьер. Нарастание тока в нешунтированных витках приводит к смещению кольца в аксиальном направлении с одновременным адиабатическим уменьшением глубины потенциальной ямы. Существует максимально возможное время шунтировки t_{max} , при котором на радиусе вывода кольца происходит снятие магнитного барьера в момент достижения максимума тока. Более раннее время шунтировки приводит к уменьшению выводного уровня маг-

нитного поля. Поэтому спадающее магнитное поле с минимальным градиентом формируется для момента шунтировки t_{\max} . При этом получается, что при шунтировке в моменты времени позже t_{\max} кольцо не выводится вследствие сохранения потенциальной ямы, а при более ранних моментах шунтировки после снятия магнитного барьера оно движется в спадающем поле с большими градиентами, причем появляется возможность отражения кольца от магнитного барьера, создаваемого заданным полем переходного участка. Это подчеркивает важность правильного выбора момента шунтировки и соответствующего формирования спадающего магнитного поля.

Спадающее магнитное поле при выводе кольца является суммой импульсных полей, сжимающих электронное кольцо, и поля переходного участка с частотой, существенно меньшей частоты импульсных полей сжатия. Поле переходного участка частично экранируется стенками адгезатора и существенно в области вывода кольца. Для стыковки импульсного поля сжатия и поля переходного участка служит корректирующий виток, исправляющий форму поля в области стенки адгезатора. Для исправления локальных неоднородностей форма корректирующего витка и геометрия витков III ступени сжатия подбирались с помощью программы ЭВМ + "Дисплей". Схема расчета была следующей. На экране осциллографа высвечиваются параметры системы и расчетное распределение поля /рис. 4/. С помощью светового карандаша можно менять параметры системы, после чего на экране высвечивается картина поля для новых параметров. Интересующие нас результаты можно выдавать на печать. Влияние стенки на распределение поля вводилось в расчет следующим образом. Сначала для выбранной геометрии витков рассчитывалось распределение поля без учета стенки и из него вычиталось экспериментальное распределение для той же геометрии. Разность этих распределений определяет влияние стенок камеры. Затем рассчитываемое распределение для новой геометрии складывалось с распределением поля от стенки. Этот способ расчета позволил нам формировать выводное поле с предельной точностью измерений.

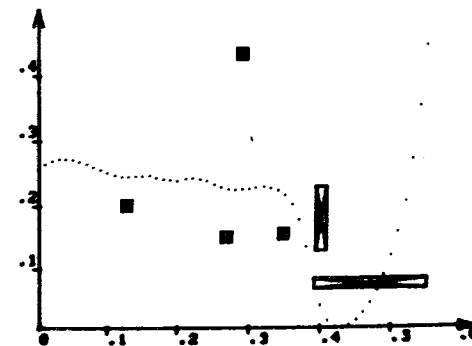


Рис. 4. Распределение поля на экране осциллографа при расчетах по программе ЭВМ + "Дисплей".

Наличие значительной индукционной связи между витками разных ступеней сжатия приводит к тому, что при срабатывании быстрого поля возбуждаются высокочастотные колебания в LC-контурах, образованных индуктивностями II и III ступеней сжатия и емкостью подводящих фидерных систем. Кроме того, происходит образование волны в линии, образованной витками быстрого поля и поверхностью камеры. Для подавления возникающих высокочастотных колебаний потребовалось провести работу по подбору шунтирующих и согласующих сопротивлений и разделению земель взаимодействующих контуров /4/.

В адгезаторе модели используются системы инжекции, связанные с изменением равновесной орбиты /5/. Инжекция происходит в постоянное мягкофокусирующее поле, определяющее равновесную орбиту на радиусе инжекции. Быстрое поле служит для отвода электронов на первых оборотах. Изменение величины индукции за оборот, обеспечиваемое быстрым полем, мало по сравнению с ве-

личной постоянной поля, и движение электронов можно считать адиабатическим. В этом случае скорость ухода электронов от инфлектора равна

$$\frac{dr}{dt} = - \frac{r}{(1-n)B_z} \left(\frac{\partial B_z}{\partial t} - \frac{1}{2} \frac{\partial \bar{B}_z}{\partial t} \right), \quad /1/$$

где B_z - величина аксиальной составляющей индукции суммарного магнитного поля, обеспечивающего движение электронов с импульсом p по орбите радиуса r ($pc = -erB_z$), n - показатель спада суммарного магнитного поля, \bar{B}_z - среднее магнитное поле на орбите. Из /1/ ясно, что для сжатия кольца необходимо:

$$\frac{\partial B_z}{\partial t} - \frac{1}{2} \frac{\partial \bar{B}_z}{\partial t} > 0, \quad /2/$$

а это накладывает ряд условий на параметры быстрого поля.

В адгезаторе модели быстрое поле создается системой витков, запитанных параллельно. В этом случае можно записать /2/ в виде:

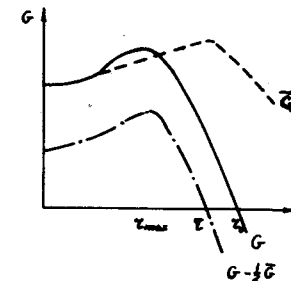
$$(G - \bar{G}/2) \dot{I} > 0, \quad /3/$$

где $\dot{I} = dI/dt$, I - ток, протекающий в витках, G и \bar{G} - величины B_z и \bar{B}_z при токе в 1 А в каждом витке. Обычный вид зависимости G и \bar{G} от r приведен на рис. 5. Как видно из рисунка, начальная точка инжекции r_{in} может быть выбрана в двух областях:

1. $r_{in} < \bar{r}$; тогда $G > \bar{G}/2$ и для выполнения условия /3/ необходимо, чтобы $\dot{I} > 0$;
2. $r_{in} > \bar{r}$; тогда $G < \bar{G}/2$ и для выполнения условия /3/ необходимо, чтобы $\dot{I} < 0$.

В каждом из двух случаев выполнение условий на производную тока можно обеспечить двумя способами, как это показано на рис. 5.

На модели использовался /5/ и осуществлен в настоящий момент вариант 1а, в котором быстрое поле нарастает во времени и добавляется к постоянному. Для наиболее эффективного отвода электронов от инфлектора при заданной величине \dot{I} начальный радиус инжекции



r_0 - радиус, на котором $G(r_0) = 0$
 \bar{r} - радиус, на котором $G(\bar{r}) = \frac{1}{2} \bar{G}(\bar{r})$
 r_{max} - радиус, на котором $G(r_{max})$ - макс.

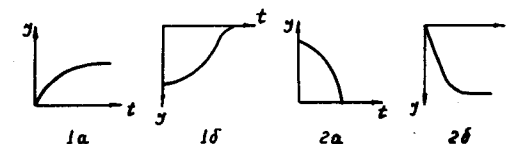


Рис. 5. Распределение магнитного поля по радиусу и токов от времени.

r_{in} желательно помещать в точке максимума разности $(G - \bar{G}/2)$, который для рассматриваемой системы 1а находится в области $r < r_{max}$ быстрого поля, поэтому суммарное n с ростом тока в его витках будет быстро уменьшаться, что недопустимо. В результате $r_{max} < r_{in} < \bar{r}$. Следовательно, в системе 1а r_{in} определяется не столько эффективностью выбора геометрии витков быстрого поля, сколько условиями на амплитуде тока в его витках при "перехвате" электронов следующей ступенью сжатия. Точка "перехвата" в осуществленной системе выбиралась на радиусе $r \approx 30$ см при $r_{in} \approx 40$ см, поскольку при длительном нахождении кольца вблизи инфлектора возможно существенное влияние искажений магнитного поля инфлектором на движение электронов в кольце. Для обеспечения указанного радиуса "перехвата" пришлось ввести дополнительную пару витков в быстрое поле

(R_2, Z_2), корректирующую n в области "перехвата". У изготовленного инфлектора со специально подобранной токовой петлей, компенсирующей искажения постоянного магнитного поля, неоднородность поля по азимуту не превосходит $\pm 0,5\%$ на $r = 38$ см. Схема формирования импульса тока в витках быстрого поля приведена на рис. 6. Применение в качестве коммутатора тиратрона ТГИ-5000/50 позволило обеспечить хорошую синхронизацию быстрого поля по времени, однако несколько ухудшило передний фронт импульса /рис. 7/. Экспоненциальный спад импульса быстрого поля задается R_1 и C_1 , скорость спада определяется скоростью нарастания тока в витках II ступени сжатия для обеспечения приемлемых n в области "перехвата". Цепочка C_2L формирует синусоидальный импульс обратного тока с амплитудой, превышающей амплитуду тока быстрого поля, и временем четверть-периода ≈ 1 мксек. Коммутирующим элементом является тиратрон ТГИ-2500/35, который может быть запущен в заданный момент времени на спаде импульса быстрого поля /рис. 8/. Указанная цепочка осуществляет быстрый сброс электронов на инфлектор и служит для исследования параметров захваченного быстрым полем пучка. Возникающее тормозное γ -излучение регистрируется ФЭУ, характерный сигнал с которого приведен на рис. 9. Первый импульс связан с γ -излучением пучка электронов при прохождении инфлектора; второй - с γ -излучением при быстром сбросе электронов на инфлектор.

В настоящее время нами исследуются другие способы формирования кольца быстрым полем. В системе 16 в начальный момент времени быстрое поле вычитается из постоянного, а затем выключается, что обеспечивает рост суммарного поля. Поскольку вклад быстрого поля в суммарное быстро падает, то появляется возможность выбирать r_{in} в максимуме разности $(G - \bar{G}/2)$, что увеличивает "промашку" электронов за оборот по сравнению с системой 1а при равных \bar{I} в момент инжекции пучка. Кроме того, система 16 свободна от недостатков 1а на "перехвате". Однако в системах 1а и 16 при инжекции нескольких оборотов пучков с нулевым энерги-

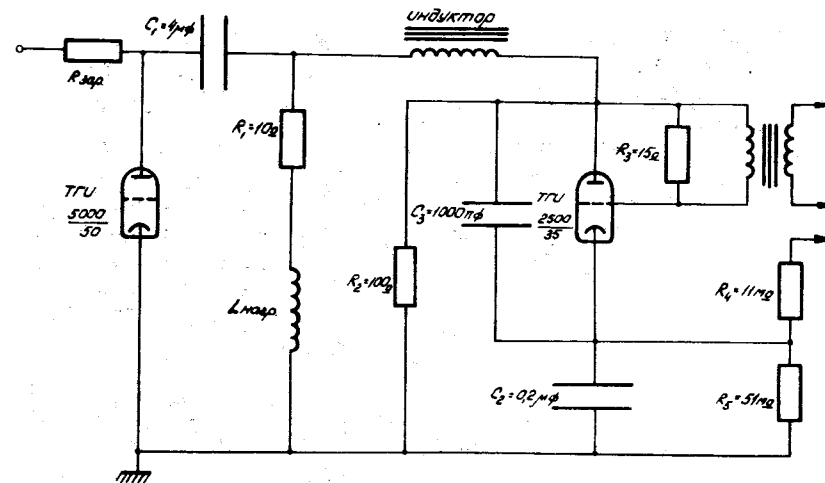


Рис. 6. Схема формирования импульсов тока в витках быстрого поля.

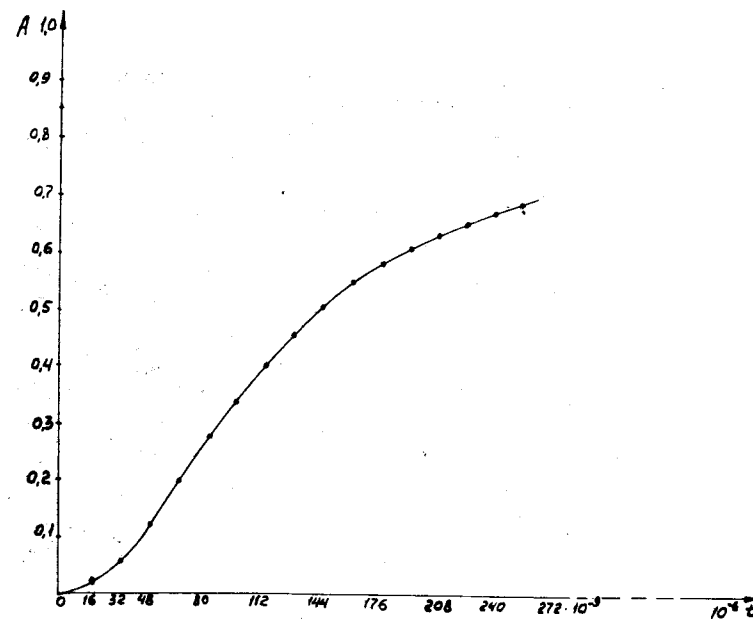


Рис. 7. Фронт импульса быстрого поля.

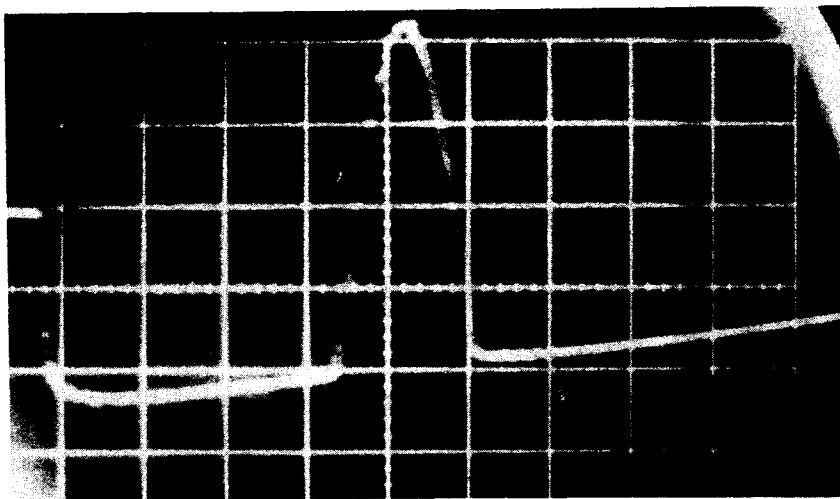


Рис. 8. Импульс быстрого поля.

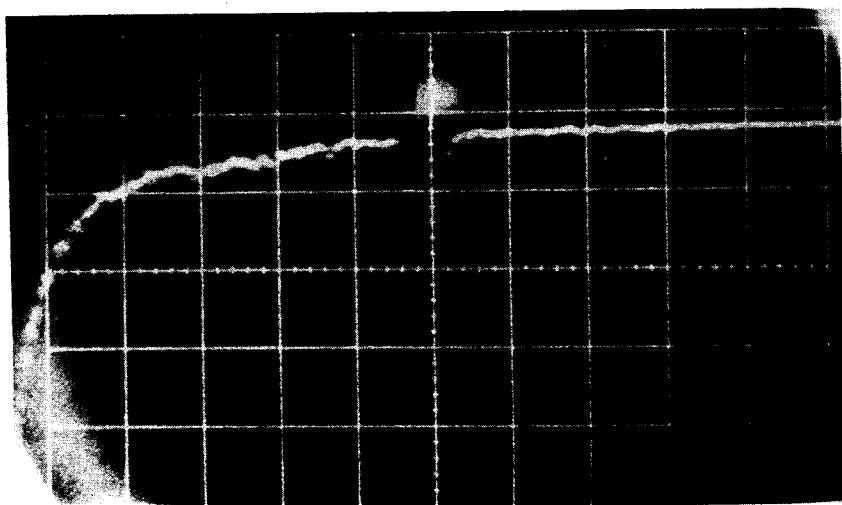


Рис. 9. Характерный сигнал тормозного γ -излучения с ФЭУ.

ческим разбросом приобретает некоторый энергетический разброс вследствие изменения среднего магнитного поля. Кроме того, среднее поле уменьшает "промашку" частиц за оборот. Можно снизить влияние \bar{G} , используя систему из двух пар витков, токи в которых текут в разных направлениях, в результате чего в области между витками $\bar{G} \ll G$. Поэтому частицы, инжектируемые в разные моменты времени, имеют практически одну и ту же равновесную орбиту, но разные амплитуды бетатронных колебаний. Максимальный размер электронного кольца будет определяться амплитудой бетатронных колебаний последних захваченных частиц. Поэтому система 1 фактически эффективна для инжекции коротких сгустков из ускорителей с достаточным энергетическим разбросом.

Для системы 2, как и для системы 1, в смысле условий на "перехвате" более предпочтительной является система 2б, в которой выключается быстрое поле. В этом случае "промашка" частиц обусловлена уменьшением среднего магнитного поля. Кроме того, поскольку $r_{in} > \bar{r}$, то малый размер получающегося кольца не превосходит $(r_{in} - \bar{r})$ / еще раз напомним, что $G(\bar{r}) = \bar{G}(\bar{r})/2$, то есть $\dot{r}(\bar{r}) = 0$ /. Таким образом, в системе 2 появляется возможность осуществить многооборотную инжекцию, так как частицы, инжектируемые в разные моменты времени, группируются к \bar{r} . Кроме того, предпочтительной особенностью этого способа инжекции следует считать возможность расположения витков быстрого поля таким образом, чтобы центр инфлектора расположился на радиусе $r_0 (G(r_0) = 0)$. Тогда амплитуда бетатронных колебаний центральных инжектирующих частиц во все моменты времени будет равна нулю. В результате захваченные частицы будут двигаться по различным равновесным орбитам без бетатронных колебаний.

В настоящее время ведутся эксперименты по определению эффективности работы рассмотренных выше систем инжекции.

В заключение авторы благодарят Ю.С.Дерендяева и А.А.Карлова за помощь в использовании программы "Дисплей" и сотрудников отдела за обсуждение изложенных выше проблем.

Литература

1. В.П.Саранцев и др. ЖЭТФ, 60, 1980 /1971/.
2. И.Н.Иванов и др. Депонированное сообщение ОИЯИ Б2-9-8168, Дубна, 1974.
3. К.А.Решетникова и др. Препринт ОИЯИ, Р9-4678, Дубна, 1969.
4. И.Габанец и др. Депонированное сообщение ОИЯИ Б2-9-8010, Дубна, 1974.
5. И.В.Кожухов и др. Препринт ОИЯИ, Р9-4715, Дубна, 1969.

*Рукопись поступила в издательский отдел
30 октября 1974 года.*