

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ФИЗИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ**



*имени
П. Н. Лебедева*

Ф И А Н

ПРЕПРИНТ

Г. Г. СУББОТИН, А. В. СЕРОВ

19

**КВАЗИНАКОПИТЕЛЬНЫЙ РЕЖИМ
РАБОТЫ СИНХРОТРОНА «ПАХРА»**

МОСКВА 2007

Квазинакопительный режим работы синхротрона «Пахра».

Г.Г.Субботин, А.В.Серов

В настоящей статье описан новый (квазинакопительный) режим ускорения синхротрона «Пахра» с частотой 2 гц, со временем ускорения электронов до максимальной энергии 8.5 мсек и длительностью цикла ускорения (длительностью плато магнитного поля) 500 мсек. В течение практически 500 мсек величина магнитного поля и, следовательно, энергия частиц в синхротроне остаются постоянными. Приведены результаты испытаний новой системы питания магнита синхротрона, работающей с частотой 2 гц.

Для повышения стабильности работы синхротрона была увеличена энергия электронов, инжектируемых в синхротрон. Для этого микротрон-инжектор был переведен во второй режим ускорения, при котором его энергия возросла от 7.4 Мэв до 11.5 Мэв.

При новом режиме работы необходимы дополнительные исследования динамики пучка при ускорении и при работе в накопительном режиме. Для этой цели была создана и испытана новая система оптической диагностики параметров ускоряемого пучка.

Представлены результаты работы микротрона во втором режиме ускорения и результаты измерений параметров пучка новой системой диагностики.

Введение

Электронный синхротрон «Пахра» Отдела физики высоких энергий на максимальную энергию электронов $E_m = 1.2$ Гэв состоит из четырех поворотных магнитов, разделенных прямолинейными промежутками. Радиус равновесной орбиты в магните $R_o = 400$ см, длина каждого прямолинейного промежутка $L = 190$ см. Инжектором синхротрона является микротрон на энергию 7.4 Мэв, работающий на первом типе ускорения. После вывода из микротрона пучок формируется электронно-оптическим трактом и при помощи магнитного инфлектора вводится в камеру синхротрона. Магнитное поле синхротрона изменяется с частотой $f = 50$ гц. Ускоряющий резонатор возбуждается на частоте 55 Мгц.

В настоящее время на синхротроне для экспериментов используется выведенный электронный пучок и рентгеновское излучение, генерируемое при пересечении мишени ускоренными частицами.

Для решения новых физических задач на синхротроне проводятся работы, расширяющие его возможности. Разработана, смонтирована и испытана новая система питания магнита, переводящая синхротрон в квазиаккумуляторный режим. В этом режиме частота магнитного поля равна $f = 2$ гц, время ускорения электронов до максимальной энергии $T_m \approx 8$ мсек, длительность ускорения (длительность плато магнитного поля) $T_p \approx 500$ мсек. Микротрон переведен во второй режим ускорения, при котором его энергия увеличилась до 11.5 Мэв. Заканчивается сооружение канала, на котором предполагается провести эксперименты в вакуумном ультрафиолетовом диапазоне синхротронного излучения.

В настоящей статье описаны работы, выполненные на ускорителе «Пахра», необходимые для перевода синхротрона на новый режим работы. Кроме того, описаны работы по переводу микротрона на второй режим ускорения и по созданию системы оптической диагностики параметров ускоряемого пучка. Приведены результаты работы синхротрона с

инжектором на энергию 11.5 Мэв и частотой магнитного поля $f = 2$ гц.

Новая система питания магнита синхротрона

Кратко опишем особенности работы системы питания при традиционном для синхротрона режиме ускорения. Ток, текущий через обмотку магнита, имеет две составляющие: постоянную составляющую I_0 и переменную синусоидальную составляющую I_1 с промышленной частотой $f = 50$ Гц. Амплитуды постоянного и переменного тока могут регулироваться независимо друг от друга. На рис.1а показана временная зависимость тока в магните синхротрона. По такому же закону изменяется и величина магнитного поля. Магнитное поле в момент инжекции электронов в синхротрон t_i имеет величину $H_i = 60$ эрс.

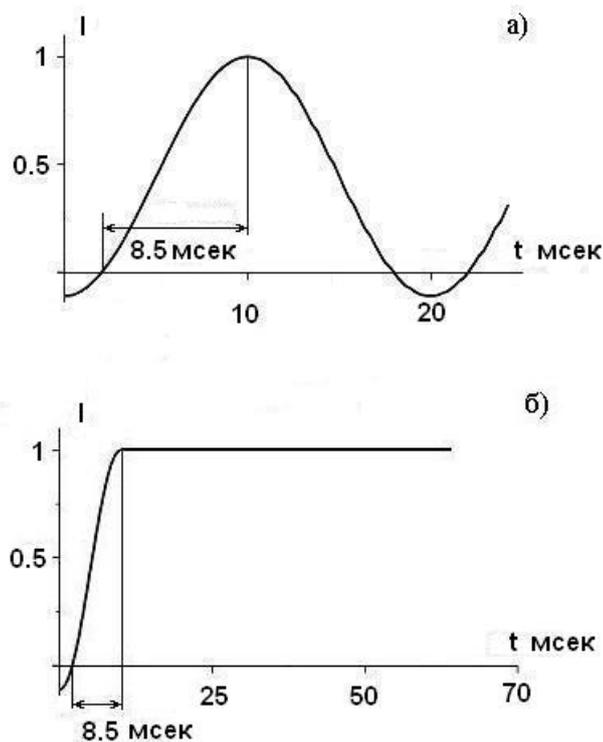


Рис.1 Зависимость от времени тока текущего через магнит при старой а) и новой б) системе питания.

Принципиальная схема питания электромагнита представлена на рис.2. Источником постоянного тока I_0 является выпрямитель ВК, который

подает ток в электромагнит ЭМ через разделительные реактора P_1 и P_2 . Для получения переменной составляющей тока, обмотки электромагнита ЭМ и конденсаторные батареи C_1, C_2, C_3 образуют колебательный контур, который возбуждается автономным параллельным инвертором тока ИТ.

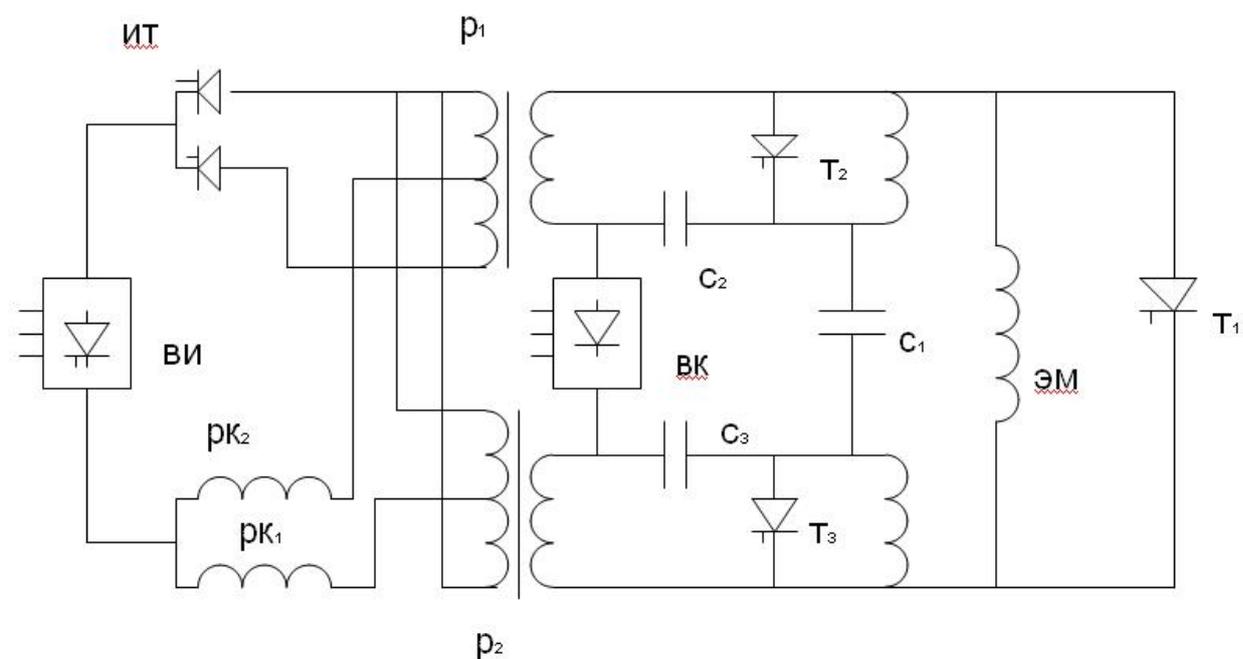


Рис.2 Схема системы питания.

Для некоторых физических экспериментов необходимо, чтобы энергия частиц в синхротроне оставалась постоянной в течение достаточно большого промежутка времени, сравнимого с длительность ускорения. Система питания позволяет в течение 3 мсек формировать плоскую вершину магнитного поля. Для получения плоской вершины и для синхронизации работы синхротрона с промышленной частотой используются теристорные ключи T_1, T_2, T_3 .

Для использования синхротрона в качестве источника излучения система питания магнита должна быть изменена. Представляется целесообразным перевести систему питания на импульсный режим работы. При этом режиме зависимость от времени тока текущего через магнит имеет вид, показанный на рис.1б. Как и при традиционном режиме

работы в импульсном режиме питание постоянным током осуществляется от выпрямителя ВК через реакторы P_1 и P_2 . На постоянную составляющую I_0 накладывается импульс тока I_{im} длительностью $\Delta t_{im} = 10$ мсек. Токовые импульсы следуют с частотой 2 гц. Схема преобразованной системы питания магнита показана на рис.3. Следует отметить, что в обеих

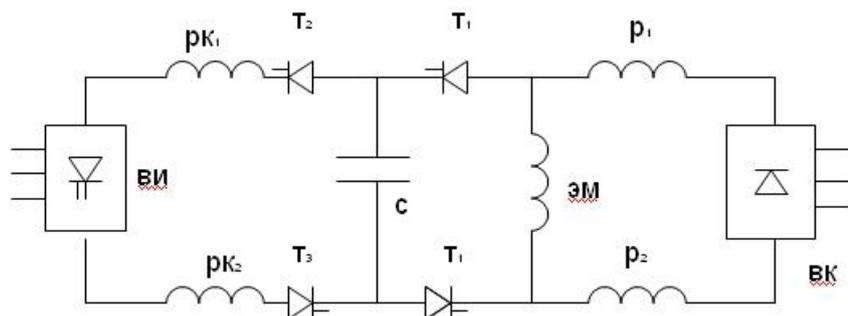


Рис.3 Схема новой импульсной системы питания.

системах питания используются одни и те же элементы и переход от одной системы к другой возможен после относительно непродолжительных монтажных работ (2-3 смены).

При импульсном режиме работы конденсаторная батарея C , заряженная от выпрямителя ВИ, разряжается через тиристорный ключ T_1 на обмотку электромагнита ЭМ. После разряда напряжение на конденсаторной батарее меняет свою полярность. В этот момент включаются тиристорные ключи T_2, T_3 и от управляемого тиристорного выпрямителя ВИ через реакторы P_{k1} и P_{k2} происходит подзарядка емкости C .

Длительность заряда емкости C составляет $T/2 = \pi \sqrt{L_{P_{1,2}} C} = 0.22$ сек, что вполне достаточно для работы с частотой 2 Гц. Декремент затухания колебательного контура LC составляет $\ln \delta = \pi R / \sqrt{L/C} = 0.0746$. При ускорении электронов до энергии 600 Мэв уменьшение напряжения на емкости за один разряд составит около 2 кВ, что меньше напряжения на выпрямителе ВИ.

Описанная импульсная система питания магнита синхротрона была смонтирована и были проведены ее испытания. Напряжения и токи, при которых проводились испытания, соответствовали режиму ускорения частиц в синхротроне до энергии 70 МэВ, что соответствует 15% от планируемой максимальной энергии. Основной целью испытаний являлась проверка работоспособности предложенной схемы и согласия полученных результатов с проведенными расчетами.

При испытаниях вместо выпрямителя ВИ использовался теристорный выпрямитель на 200 В. При напряжении на выпрямителе 150 в на обмотке электромагнита был получен импульс напряжением 2.5 кВ, длительностью 8.5 мсек. Длительность зарядного тока составляла 200 мсек. Некоторое уменьшение длительности импульса тока и длительности зарядного тока по сравнению с расчетными, по-видимому, связано с тем, что величина емкости C была меньше, чем 400 мкф.

Испытания выявили некоторые трудности синхронизации работы ключей T_2 и T_3 с импульсами выпрямителя ВИ. Ток за время управляющего импульса в теристорах T_2 и T_3 не достигал величины тока удержания. Поэтому теристорные ключи были заменены диодами.

Результаты испытаний позволили выработать требования к элементам системы импульсного питания. В первую очередь необходимо изготовить диодные сборки на более высокие напряжения. Это позволит достичь токов и напряжений на обмотке питания магнита, при которых возможно ускорение электронов до энергии 300-350 МэВ. При этой энергии можно проводить полномасштабные испытания, как самой системы питания магнита, так и изучать особенности динамики ускоряемых частиц в квазиаккумулятивном режиме на синхротроне «Пахра».

Микротрон

Увеличение энергии инжектируемых частиц существенно влияет на работу синхротрона. Во-первых, при повышении энергии электронов

возрастает величина поля синхротрона в момент инжекции. Это приводит к тому, что остаточные поля и поля вихревых токов, наведенных в полюсах магнита, вакуумной камере и обмотках возбуждения, станут меньше по сравнению с основным магнитным полем и, следовательно, внесут меньшую погрешность. Во-вторых, ослабевают влияние полей пространственного заряда. Сила пространственного заряда обратно пропорциональна квадрату энергии частиц ($F \sim \gamma^{-2}$). В-третьих, увеличение энергии уменьшает потери электронов из-за рассеяния на остаточном газе в момент инжекции и накопления частиц в камере синхротрона. Сечение рассеяния на газе, так же как и сила пространственного заряда, обратно пропорциональна квадрату энергии частиц ($\sigma \sim \gamma^{-2}$). Поэтому увеличение энергии инжекции в два раза приведет к уменьшению потерь в четыре раза. Как показывает опыт эксплуатации, потери по этой причине самые большие при ускорении в синхротроне.

При работе в первом режиме ускорения энергия электронов на выходе микротрона составляет 7,4 МэВ. При переводе во второй режим ускорения энергия возросла до 11,5 МэВ (в 1,5 раза).

Во втором типе ускорения напряженность поля в резонаторе и прирост энергии электронов при каждом прохождении через резонатор выше, чем в первом типе ускорения. Увеличивается также и величина ведущего магнитного поля. Поэтому при тех же самых габаритах магнита микротрона и его камеры можно повысить энергию ускоряемых частиц. На рис.4 показаны резонаторы микротронов, работающих на первом и втором типе ускорения, и траектории частиц в них на первых оборотах. Верхний рисунок соответствует первому типу ускорения, нижний рисунок – второму. В резонаторе микротрона в переменном электромагнитном поле происходит эмиссия электронов из катода, их захват в ускорительный режим, ускорение и фокусировка. Резонатор выполняет несколько

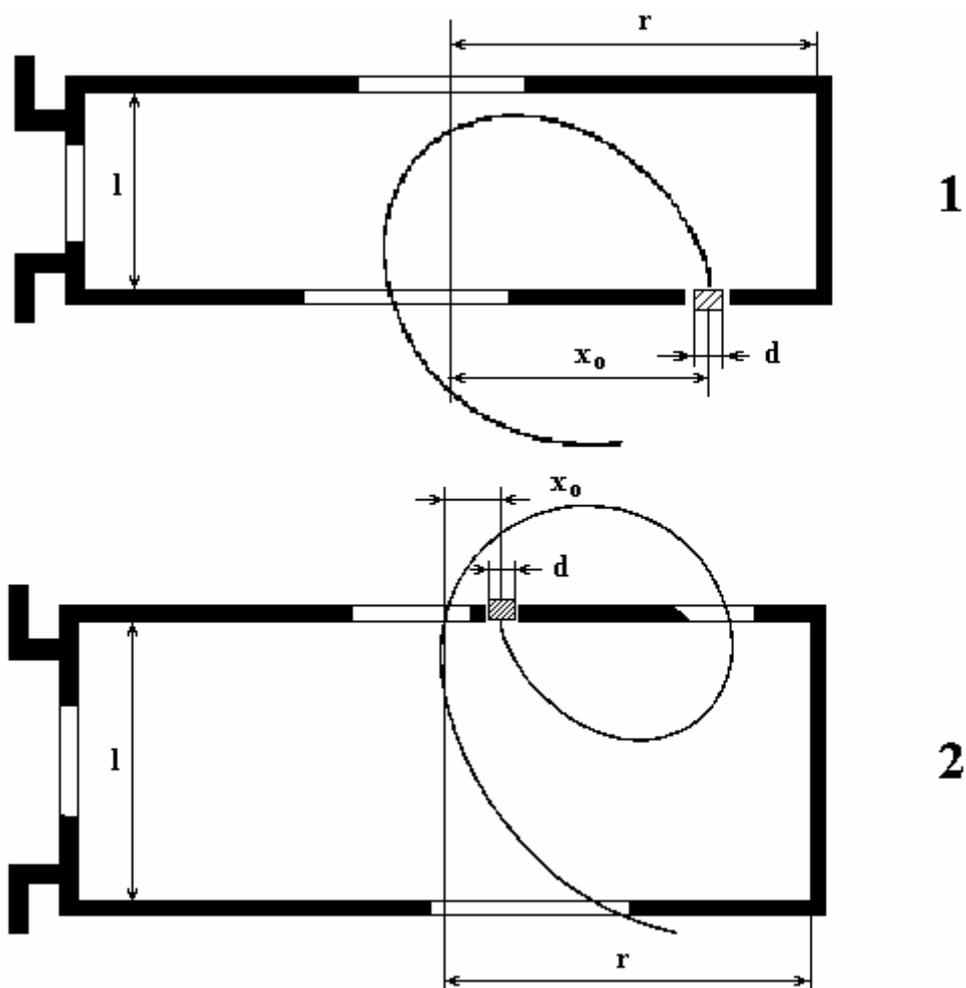


Рис.4 Резонаторы микротрона при первом и втором типе ускорения.

функций одновременно и поэтому в значительной мере именно конструкция резонатора определяет эффективность работы микротрона.

В обоих типах ускорения в резонаторе возбуждается колебание E_{010} , длина волны которого λ не зависит от толщины резонатора l , а определяется только радиусом резонатора r . Конструкции резонаторов для первого и второго типа ускорения имеют существенные отличия. В первом типе ускорения эмиттер располагается достаточно далеко от пролетного отверстия. Во втором типе электроны инжектируются вблизи оси резонатора в максимальном ускоряющем поле. Это предъявляет более высокие требования к обработке внутренней поверхности резонатора, особенно вблизи эмиттерного отверстия. При втором типе ускорения после первого полуоборота частицы вылетают из резонатора через дополнительное отверстие.

При изготовлении резонатора в качестве основных размеров были приняты размеры резонатора описанного в работе [1]. Однако эксперименты и последующие подгонки привели к изменению положения и формы пролетных отверстий. Кроме того, возникла необходимость введения в конструкцию резонатора дополнительного элемента. Дело в том, что традиционно эмиттер в микротроне нагревается вспомогательным электронным пучком. Но в нашем случае, поскольку эмиттер располагался достаточно близко от входного пролетного отверстия резонатора, он подвергался дополнительному нагреву электронами, выходящими из резонатора на инжекционном обороте. Этот паразитный нагрев очень трудно контролировать и стабилизировать. Поэтому для его исключения был поставлен дополнительный экран. Такой способ защиты от дополнительного нагрева был рекомендован Г.Д.Богомоловым.

При изменении режима работы микротрона необходимо поднять величину ведущего магнитного поля, повышая ток в обмотках возбуждения магнита. В первом типе этот ток составляет 30 а. Для работы микротрона во втором режиме был изготовлен новый стабилизированный источник с током 60 а и стабильностью не хуже 10^{-3} . Повышение тока приводит к увеличению нагревания обмоток магнита. Во время работы в первом режиме ускорения было достаточно естественно-воздушного охлаждения обмоток. При переходе ко второму режиму необходимо принудительное воздушное охлаждение. Для этого использовались четыре бытовых вентилятора.

Экспериментальный подбор формы и положения пролетных отверстий, глубины погружения эмиттера в катодное отверстие позволил получить на последней орбите микротрона ускоренный ток 35 ма. На рис.5 приведены экспериментально измеренные зависимости коэффициента захвата микротрона $K\%$ от тока эмиссии I_{em} . Зависимости получены при

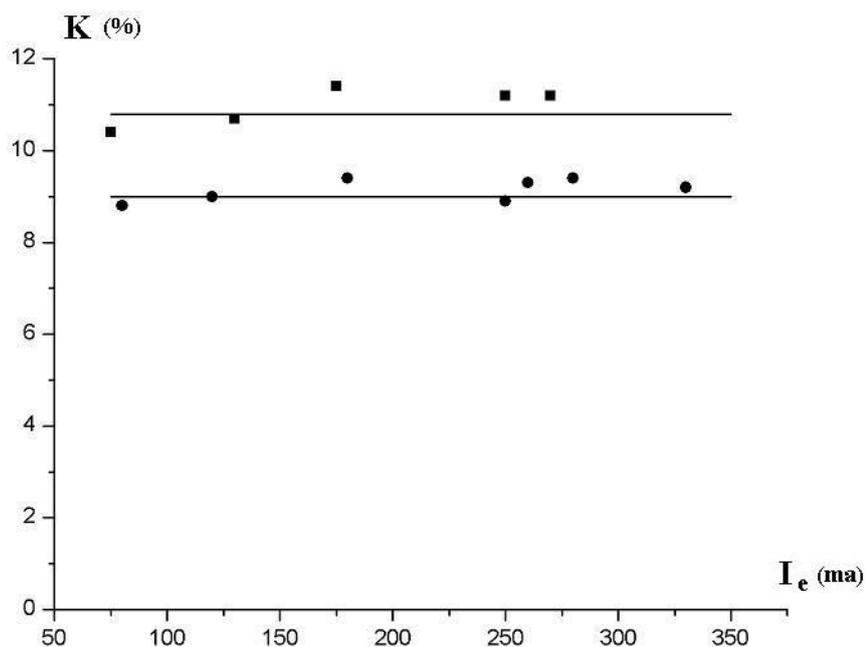


Рис.5 Зависимость коэффициента захвата от тока инжекции.

различных величинах глубины погружения эмиттера.

Повышение энергии частиц сделало необходимым новый расчет электронно-оптического тракта, увеличения токов питания линз, корректоров и инфлектора.

Оптическая диагностика параметров пучка

Оптимизация нового режима работы синхротрона требует исследования динамики пучков в процессе ускорения и накопления. Ранее исследование динамики поперечного сечения электронного пучка на синхротроне «Пахра» проводилось методом скоростного фотографирования [2]. За цикл ускорения снималось 10–11 кадров. Для пересчета почернений в изображении поперечного сечения сгустка в интенсивность излучения необходимо знать характеристическую кривую киноплёнки. С этой целью на используемую плёнку фотографировали ступенчатый ослабитель. Знание характеристической кривой позволяло обрабатывать на микрофотометре изображение пучка на киноплёнке.

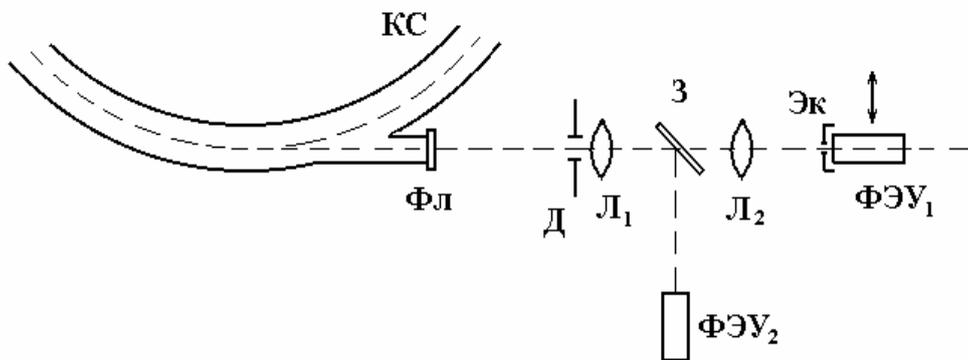


Рис.6 Схема установки оптической диагностики параметров пучка.

При исследовании новых режимов работы синхротрона очень важна оперативная информация о поперечных размерах пучка и его положении в камере. Метод скоростного фотографирования не может применяться для оперативной диагностики, поэтому была создана новая установка, использующая для индикации светового потока фотоэлектронный умножитель.

Схема установки показана на рис.6. Синхротронное излучение выводилось из камеры синхротрона КС через фланец ФЛ. С помощью линз L_1 и L_2 излучение собиралось в некоторой точке оптической оси установки, образуя промежуточное изображение. На линзе L_1 установлена щелевая диафрагма, позволяющая уменьшить азимутальную протяженность участка орбиты, с которой собирается излучение. Оптическая система имела увеличение равное единице. Поэтому в нашем случае в некоторой точке оптической оси практически имелось изображение поперечного сечения пучка с радиальным размером ~ 10 мм и вертикальным ~ 5 мм. В этой точке располагался фотоэлектронный умножитель $\PhiЭУ_1$, на входном окне которого находился экран Эк с круглой диафрагмой диаметром 1мм. $\PhiЭУ_1$ можно было дистанционно перемещать перпендикулярно оптической оси установки, измеряя

распределение интенсивности излучения по поперечному сечению изображения. Поскольку ширина пучка d более чем на два порядка меньше радиуса равновесной орбиты R_0 , можно считать, что мощность излучения, испускаемая отдельным электроном, не зависит от его положения в сгустке. Поэтому распределение яркости по поперечному сечению пучка совпадает с распределением плотности электронов.

На оптической оси имеется полупрозрачное зеркало Z , отводящее 30% интенсивности синхротронного излучения в фотоэлектронный умножитель $\PhiЭУ_2$. Поток, падающий на этот фотоумножитель, не диафрагмировался. Поскольку диаметр катода фотоумножителя был больше поперечного размера изображения, то сигнал с $\PhiЭУ_2$ пропорционален ускоряемому току и использовался для нормировки зависимостей интенсивности излучения I от времени t , которые измерялись $\PhiЭУ_1$.

Были проведены измерения поперечного распределения плотности электронов при ускорении частиц до энергии 350 МэВ и 650 МэВ. Сигнал с $\PhiЭУ_1$ регистрировался цифровым осциллографом. Результаты измерений сохранялись в виде файлов, в которых интенсивность излучения (усредненная за время $\delta t = 1$ мксек) фиксировалась через интервалы времени $\Delta t = 20$ мксек. В проведенных экспериментах с большой точностью можно полагать, что энергия частиц в синхротроне изменяется во времени по синусоидальному закону. Энергия достигала максимума в момент времени $t = 8.5$ мсек и затем уменьшалась. Длительность импульса высокочастотного напряжения на резонаторе T_v можно было изменять в диапазоне от 1 мсек до 18 мсек. При длительностях $T_v > 8.5$ мсек в синхротроне, после достижения максимальной энергии, происходило замедление частиц. Это давало возможность изучать динамику поперечных размеров пучка при его торможении.

В экспериментах, при заданных поперечных координатах r_i , фотоэлектронным умножителем $\PhiЭУ_1$ регистрировались зависимости

интенсивности излучения от времени $I_r(t)$. $\Phi ЭУ_1$ перемещался с шагом $\Delta r = r_{i+1} - r_i = 1.2$ мм. Уже сами зависимости $I_r(t)$ позволяют качественно судить об изменении поперечного размера пучка и его положения в камере синхротрона. Для иллюстрации этого на рис.7 представлены некоторые осциллограммы $I_r(t)$ полученных при ускорении частиц до энергии 650 Мэв и длительности импульса ВЧ $T_v = 16$ мсек. (показана каждая вторая осциллограмма из последовательности измеренных, т.е. осциллограммы

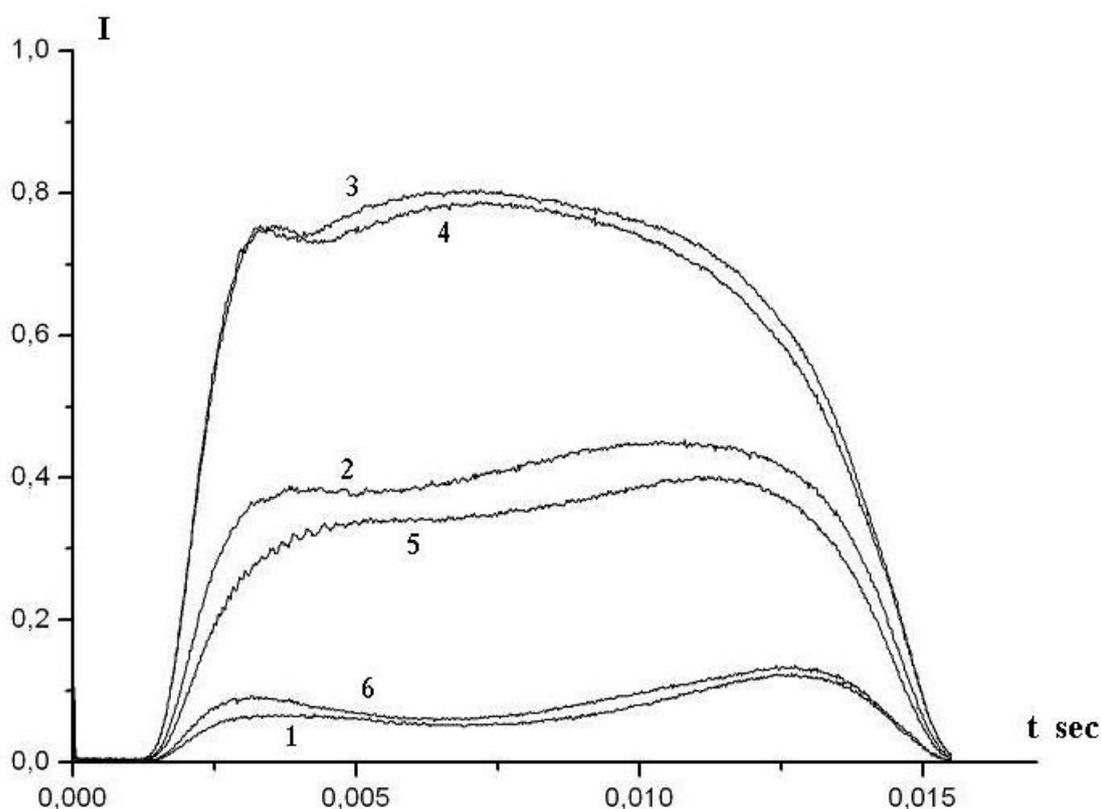


Рис.7 Зависимость от времени интенсивности излучения.

измерены в точках расположенных на расстоянии $\Delta r = 2.4$ мм одна от другой). Кривые 1 и 6 иллюстрируют зависимость от времени плотности электронов на краях сгустка, а кривые 3 и 4 – в середине сгустка. Видно, что до момента времени $t \approx 6$ мсек поперечные размеры сгустка уменьшаются, поскольку плотность частиц в середине сгустка увеличивается, а на периферии сгустка уменьшается. В дальнейшем размеры сгустка увеличиваются, т.к. уменьшается плотность в середине и

увеличивается на краях сгустка.

Серия осциллограмм, подобных показанным на рис.7, позволяет количественно описать изменение положения пучка в камере и изменение поперечного размера сгустка. Для этого программным способом в файлах производилась выборка интенсивностей излучения $I_r(t_j)$ измеренных в заданный момент времени t_j . Это позволяло для заданного момента времени t_j построить зависимость интенсивности излучения от поперечной координаты r_i (поперечной координаты $\Phi ЭУ_1$). Пример такой зависимости показан на рис.8. Точки на рисунке соответствуют

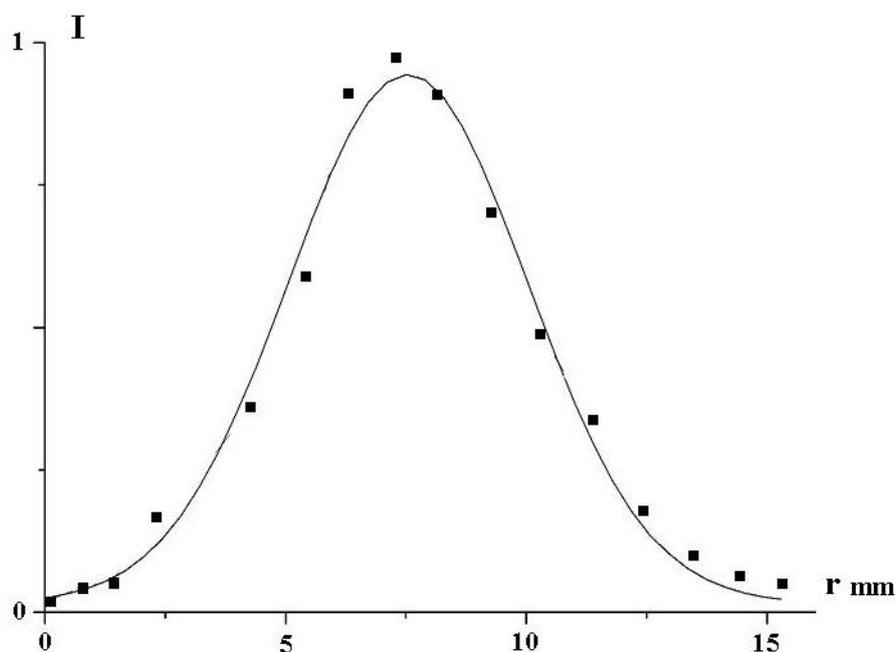


Рис.8 Поперечное распределение частиц в пучке.

значениям интенсивности в заданный момент времени t_j на осциллограммах, соответствующих различным поперечным координатам $\Phi ЭУ_1$. Кривая на рис.8 показывает гауссовскую зависимость аппроксимирующую экспериментальные точки. Как видно из рисунка, гауссовская зависимость достаточно хорошо описывает экспериментальные результаты. В нашем случае ширина гауссовской кривой эквивалентна ширине сгустка, а положение максимума кривой

определяет поперечную координату пучка в камере.

Построение таких распределений для различных моментов времени дает возможность построить зависимость от времени поперечного размера сгустка $d(t)$ и его положения в камере синхротрона $r(t) = R(t) - R_0$, где $R(t)$ радиус орбиты. На рис.9 показаны поперечные распределения частиц в пучке при выводе электронов из синхротрона. Распределения получены

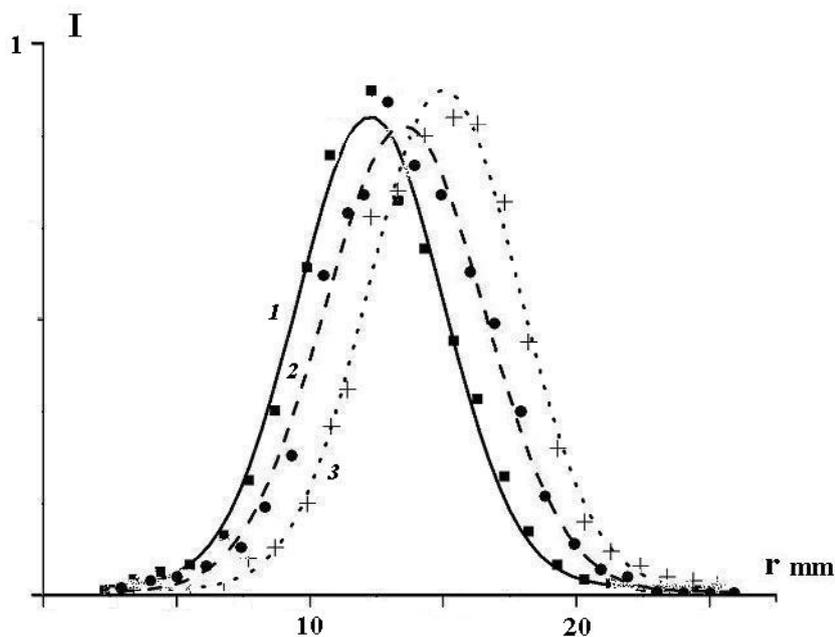


Рис.9 Поперечные распределения частиц при выводе пучка.

для различных моментов времени: кривая 1 соответствует моменту времени $t_j = 7.8$ мсек, кривая 2 — $t_j = 8$ мсек, кривая 3 — $t = 8.2$ сек. Приведенные распределения позволяют вычислить значения скорости смещения пучка и судить об изменении пространственного распределения частиц при выводе электронов.

На рис.10 представлена зависимость от времени ширины электронного пучка. Верхняя кривая соответствует случаю, когда измерения проводились при ускорении частиц до максимальной энергии равной 350 Мэв, а нижняя кривая — до энергии 650 Мэв. В первом случае длительность импульса высокочастотного напряжения на резонаторе была равна $T_v = 8$

мсек, а во втором - $T_v = 10$ мсек. В обоих случаях частица имеет максимальную энергию в момент времени $t = 8.5$ мсек, поэтому во втором случае электроны некоторое время движутся в спадающем магнитном поле и уменьшают свою энергию.

Из рисунка видно, что пучок имеет минимальный поперечный размер не при максимальной энергии, а в более ранний момент времени.

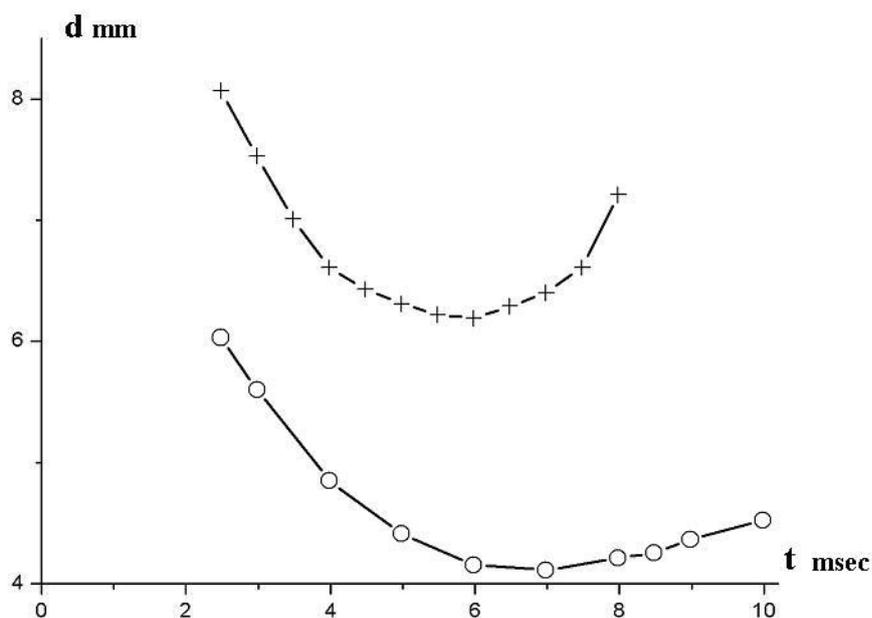


Рис.10 Зависимость ширины пучка от времени.

К моменту времени, когда энергия частиц максимальна, ширина пучка уже заметно возрастает. Можно указать несколько причин такой зависимости ширины ускоряемого пучка за время ускорения [3]. В частности, такой причиной может быть плохой вакуум в некоторой части камеры. К такому же результату могут приводить квантовые флуктуации излучения, взаимодействия частиц пучка, взаимодействие ускоряемого пучка с резонатором или с каким-либо резонирующим объемом вакуумной камеры. Последующие эксперименты позволят оценить вклад каждой из причин в наблюдаемую зависимость.

Пространственные распределения, показанные на рис.8, можно использовать не только для получения информации о поперечных

размерах пучка, но также и для измерения величины ускоренного тока. Как показывают расчеты, на синхротроне «Пахра» интенсивность синхротронного излучения в оптическом диапазоне длин волн при энергиях частиц выше 150 МэВ практически не зависит от энергии. Поэтому в интервале времени от 3 мсек до 13 мсек можно считать, что интенсивность определяется только числом излучающих электронов. Количество частиц в камере синхротрона пропорционально площади ограниченной гауссовской кривой. Эксперименты показали, что в случае когда ускорение происходит без потерь (потери регистрировались другими датчиками) площадь под гауссовской кривой в интервале 3 - 13 мсек остается постоянной с точностью лучше 5%. А в интервале от 6 мсек до 10 мсек точность достигала величины 1%.

Измерения показали, что созданная система диагностики и обработки полученных сигналов позволяет с высокой точностью фиксировать поперечные размеры ускоряемого пучка и его положение в камере синхротрона.

Авторы благодарны В.Д.Алешину, Г.А.Зачесову, В.Г.Иванову за изготовление и монтаж резонатора микротрона и элементов новой системы питания и В.А.Карпову за помощь при проведении экспериментов. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант 05-08-33689)

Литература

1. Г.Д.Богомолов, А.Б.Маненков, А.Р.Мирзоян. ПТЭ, 2000, № 4, 95.
2. Ю.А.Башмаков, В.А.Карпов, А.С.Яров. ЖТФ, т.54, в.5, 905, 1984.
3. А.А.Коломенский, А.Н.Лебедев. Теория циклических ускорителей, М., Физматгиз, 1962.