

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ФИЗИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ**



*имени
П. Н. Лебедева*

Ф И А Н

ПРЕПРИНТ

28

Е. Г. БЕССОНОВ,
Е. И. МАЛИНОВСКИЙ,
Г. Г. СУББОТИН

**ГЕНЕРАЦИЯ ПУЧКА ФОТОНОВ
С ЭНЕРГИЕЙ МЕНЕЕ 100 МЭВ
НА СИНХРОТРОНЕ С - 25Р «ПАХРА»**

МОСКВА 2006

Генерация пучка фотонов с энергией менее 100 МэВ на синхротроне С-25 Р «Пахра»

Е.Г. Бессонов, Е.И. Малиновский, Г.Г. Субботин

Аннотация

В работе описана методика получения тормозного пучка фотонов малых энергий (40-100 МэВ) на 1.2 ГэВ электронном синхротроне «Пахра» Физического института им. П.Н. Лебедева РАН. Генерация фотонов малых энергий на внутренней мишени синхротрона проводилась на спаде магнитного поля. Для наведения электронов на мишень было использовано локальное искажение орбиты путем подачи на дополнительные обмотки отдельных блоков магнита синхротрона импульсного тока. Для этих целей была разработана, смонтирована и налажена система питания указанных обмоток.

Small energy bremsstrahlung beam at the Synchrontron C-25P “Pakhra”

E.G. Bessonov, E.I. Malinovski, G.G. Subbotin

Abstract

A method of low-energy (40-100 MeV) bremsstrahlung beam production at 1.2 GeV electron synchrotron “Pakhra” of Lebedev Physical Institute is presented. Low energy photons had been produced on the internal target of synchrotron at the negative slope of the magnetic field of the synchrotron. To put electrons on the target the local bump was used by means of feeding of impulse current on the extra windings of some blocks of bending magnets of the synchrotron. The supplying system of the windings was developed, mounted and put in operation.

1. Введение

Исследования, которые ведутся на электронном синхротроне С-25Р «*Пахра*» и планируются на ближайшее время, связаны с проверкой предсказаний низкоэнергетических моделей, основанных на квантовой хромодинамике, исследованием основных свойств адронов и ядер, конфаймента, а также свойств и взаимодействий составляющих кварков. Решение этих задач требует не только углубленного теоретического анализа уже имеющихся экспериментальных данных, но и проведение новых экспериментов на более высоком уровне точности. С этой целью используются пучки различных ускорителей, в том числе пучки электронов и фотонов, подобные тем, которые имеются на электронном синхротроне "*Пахра*" Физического института им. П.Н. Лебедева РАН в г.Троицке. Синхротрон имеет частоту повторения 50 Герц и позволяет работать при энергии ускоренных электронов в диапазоне 300 ÷ 1300 МэВ и интенсивности пучка $2 * 10^{12}$ электронов в секунду. Наличие системы растяжки пучка (во время сброса на внутреннюю мишень ускорителя) до 3 миллисекунд обеспечивает фактор заполнения (*Duty Faktor*) до величины 0.15. Это предоставляет возможность использовать его в качестве базовой установки для исследований по физике электромагнитных взаимодействий в области промежуточных энергий. Наличие трех автономных каналов для пучков тормозного излучения и выведенного пучка электронов позволяет проводить одновременно несколько экспериментов. На ускорителе впервые был проведен эксперимент по измерению поляризуемости заряженного пиона в процессе радиационного фоторождения, продолжается эксперимент по измерению поляризуемости нейтрона в процессе неупругого рассеяния фо-

тонов на дейтроне, ведутся работы по исследованию связанных состояний эта-мезона с ядрами в реакции фоторождения [1].

Вместе с тем планируемые эксперименты по поиску и исследованию нового вида ядерной материи - сверхтяжелых дибарионов и по проверке предсказаний киральной симметрии для околопорогового фоторождения пионов, требуют модернизации самого синхротрона "*Пахра*", улучшения параметров пучков тормозных фотонов и выводимого электронного пучка. Такая модернизация необходима для создания пучка меченых фотонов с хорошим энергетическим разрешением и высокой интенсивностью. Она позволит ускорить проведение уже начатых исследований и повысить качество и достоверность получаемых данных, а также существенно расширит круг будущих экспериментальных исследований, в число которых, помимо вышеупомянутых работ, смогут войти эксперименты по измерению сечений рассеяния фотонов, фоторождения пионных пар и эта-мезонов.

Помимо работ в области физики частиц на синхротроне "*Пахра*" проводятся методические работы по созданию и калибровке физической аппаратуры, работы по созданию различных источников излучения в широком диапазоне спектра, исследуются процессы рентгеновского излучения электронов в периодических средах. Подобные работы направлены на разработку и создание новых эффективных источников квазимонохроматического рентгеновского излучения с плавно перестраиваемой энергией квантов, представляющих большой интерес для промышленности, медицины, различных областей науки. На синхротроне ведется ряд других прикладных работ. Особое место среди них занимает изучение эффекта вторичного излучения при облучении пучком гамма-квантов веществ, содержащих азот и углерод. Эти исследования проводятся в рамках проекта по разработке систем для поиска взрывчатых и наркотических веществ. Для этих целей решалась проблема вывода из синхротрона фотонного пучка с энергией менее 100 МэВ.

2. Генерация пучков тормозного излучения

2.1 Традиционная схема получения тормозного пучка.

Пучки фотонов тормозного излучения на электронном синхротроне образуются при взаимодействии ускоренного пучка с мишенью, помещенной внутрь вакуумной камеры ускорителя. Синхротрон С-25Р рассчитан и используется для получения гамма-квантов с энергией 350-1200 МэВ. Работа синхротрона при энергии менее 350 МэВ неэффективна и неустойчива из-за больших радиальных размеров электронного пучка в камере ускорителя, что приводит к резкому снижению интенсивности выведенного пучка фотонов. Кроме того, при этих энергиях система питания синхротрона работает неустойчиво.

Магнитное поле электромагнита синхротрона "Пахра" состоит из переменной и постоянной составляющих. Переменная составляющая изменяется по синусоиде с периодом 20 мс. Цикл магнитного поля и соответственно цикл ускорения представлен на Рис.1. При традиционном режиме получения тормозного пучка синхротрона электроны от энергии инжекции, равной 7 МэВ (точка А на рисунке), ускоряются до максимальной энергии E_{\max} (точка С), после чего сбрасываются на внутреннюю мишень. Сброс происходит за счет изменения амплитуды ускоряющего высокочастотного поля.

2.2 Вывод тормозного пучка малых энергий из синхротрона .

Вывод фотонного пучка малых энергий $E_0 = (40 \div 100 \text{ МэВ})$ можно осуществить в любой момент цикла изменения энергии электронов (например, при энергии $E_0 = 55 \text{ МэВ}$ соответствующей точкам В* и В, если длительность высокочастотного ускоряющего поля больше 18 мсек.). При этом энергия электронов пучка может достигать максимальной энер-

гии 500 - 800 МэВ (точка С) и потом опускается до энергии 55 МэВ. Размер пучка в процессе ускорения определяется тремя факторами: адиабатическим затуханием бетатронных и фазовых колебаний, радиационным затуханием и квантовой раскачкой.

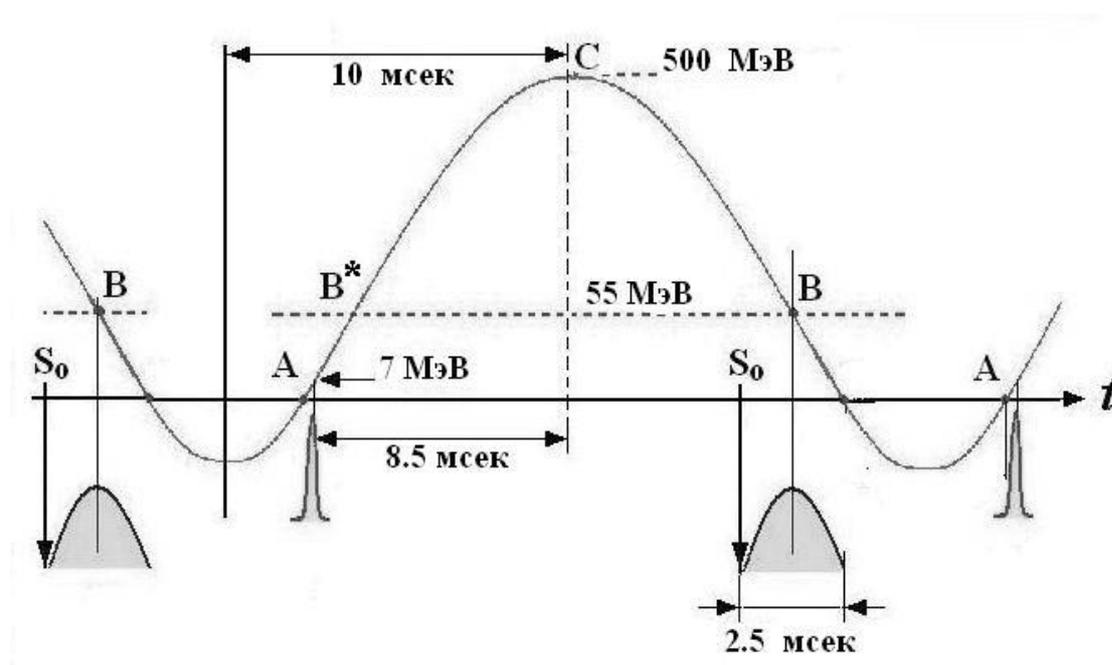


Рисунок 1. Временная развертка цикла магнитного поля:
А – момент инжекции пучка в камеру ускорителя, **С** – максимальная энергия ускоряющего поля, **В** и **В*** - промежуточные состояния пучка электронов при значении энергии E_0 , **S₀** – момент включения импульса тока на дополнительные обмотки.

Адиабатическое затухание, которое обратно пропорционально корню из величины магнитного поля, не влияет на соотношение размеров пучка в точках **В** и **В***, т.к. магнитное поле в этих точках одинаково. Квантовая раскачка вносит существенное влияние на процесс необратимого радиационного затухания при энергиях выше 500 МэВ. На рисунок 2 приведена зависимость радиационного затухания амплитуды радиальных бетатронных колебаний электронов в синхротроне $A(t_i + T)/A(t_i)$ от относительной энергии для одного цикла магнитного поля в синхротроне. Кривая 1 представляет результаты расчета с учетом квантовой раскачки

амплитуд колебаний, а кривая 2 - без учета. Расчеты проводились с использованием программы Maple 8.

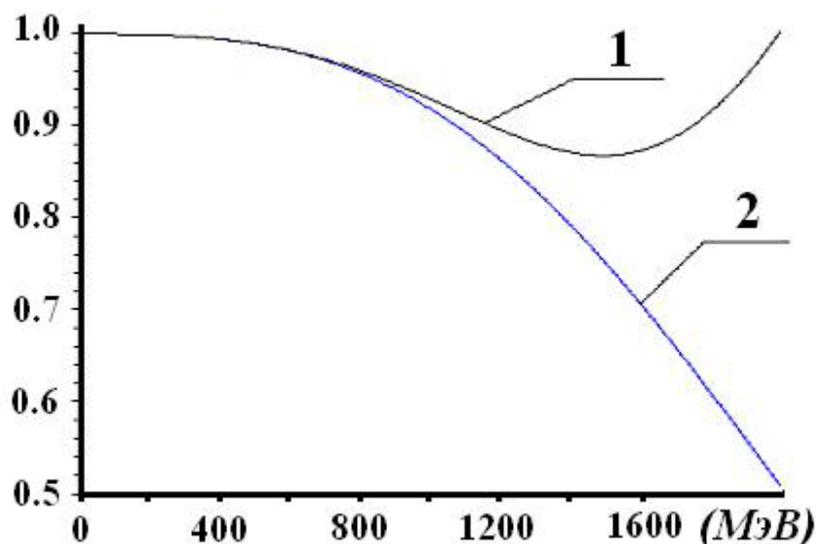


Рисунок 2. Зависимость радиационного затухания амплитуды радиальных бетатронных колебаний электронов в синхротроне $(At_i + T)/A(t_i)$ за время одного цикла магнитного поля в синхротроне от относительной энергии γ_{\max} . Кривая 1 учитывает, а кривая 2 не учитывает квантовую раскачку амплитуд колебаний. Расчеты проведены с использованием программы Maple 8.

Согласно расчетам, минимальный размер при низких энергиях $E < 100$ МэВ электронный пучок в синхротроне «Пахра» имеет при работе в режиме с максимальной энергией $E_{\max} \sim 800$ МэВ.

Слабофокусирующий синхротрон С-25Р имеет показатель спада магнитного поля $n = 0.53$. В момент инжекции он специальными обмотками коррекции, запитываемыми постоянным током, смещается до $n = 0.2$, а в процессе ускорения возвращается к своему естественному значению, проходя через резонанс связи $n = 0.5$ при энергии ~ 100 МэВ. В начальный момент ускорения радиальные размеры пучка существенно больше вертикальных (соответственно ~ 14 и 6 см). При прохождении резонанса связи радиальные бетатронные колебания перекачиваются в вертикальные, и пучок становится примерно круглым с размерами ~ 3 мм при энергии ~ 650 МэВ. Это явление экспериментально наблюдалось в работе [2]. Ради-

альный размер пучка в точке В был бы лишь на $\sim 10\%$ меньше размера пучка в точке В* из-за радиационного затухания амплитуд бетатронных колебаний. Но из-за влияния резонанса связи он уменьшается ~ 2 раза при соответственном увеличении вертикального размера.

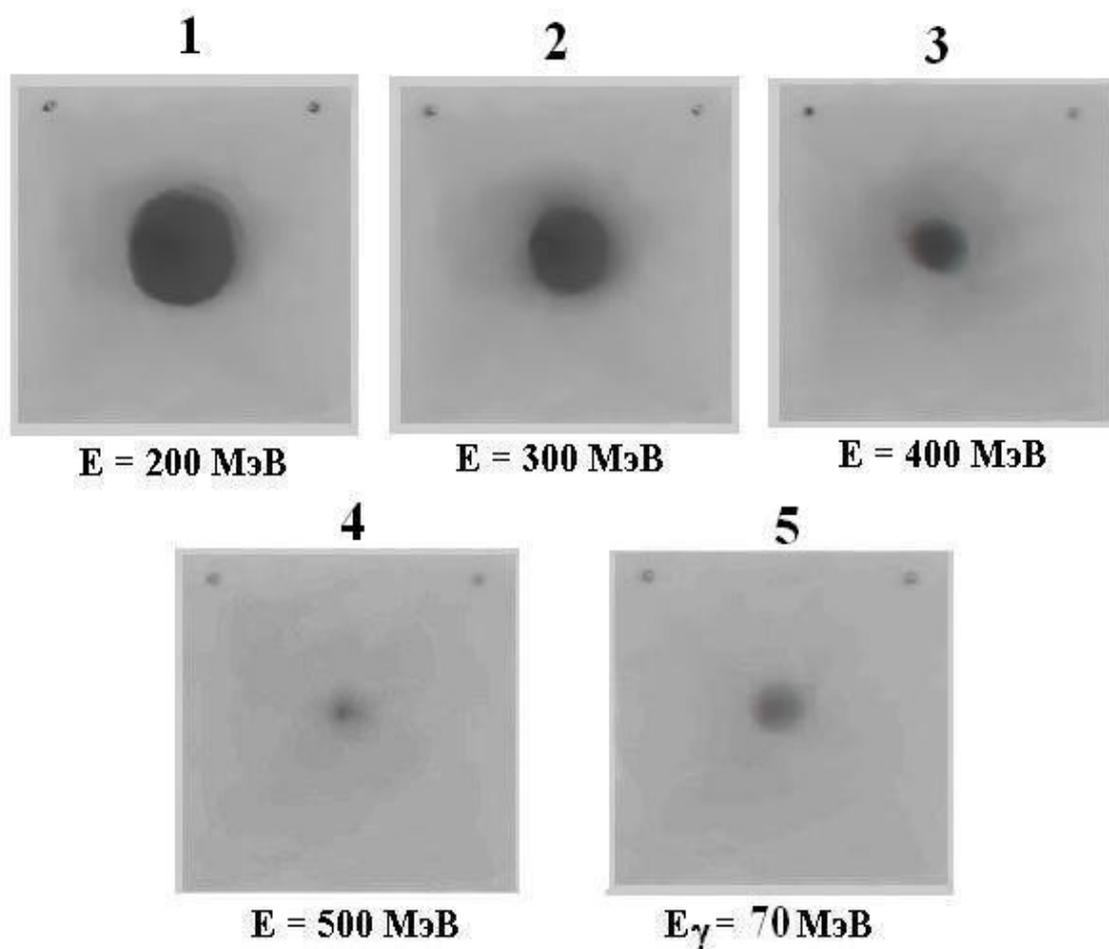


Рисунок 3. Поперечные размеры тормозного пучка фотонов, полученного традиционным методом, на расстоянии 4 м от выходного окна синхротрона при различных максимальных энергиях ускоренных электронов (1 - 4) и размеры пучка фотонов при выводе методом искажения орбиты в точке В (5), соответствующей энергии 70 МэВ.

Факт зависимости размеров пучка от величины энергии подтверждается и непосредственным измерением поперечного размера тормозного фотонного пучка, который отражает характеристики электронного пучка. На Рисунке 3 (фото 1- 4) показаны изображения фотонного пучка на рентгеновских пленках (пленки были установлены на расстоянии 8 м от внутренней мишени), полученные при экспозиции

фотонами при различных максимальных энергиях тормозного пучка, выведенного из синхротрона традиционным методом на вершине магнитного поля. Из представленных фотографий видно, что минимальные размеры пучок имеет при энергиях 500 МэВ (и выше), увеличиваясь с уменьшением энергии. При энергии 200 МэВ его величина уже сравнима с размером выходного окна из камеры синхротрона (на соответствующем фото справа вверху просматривается изображение выходного патрубка).

Направленность фотонного пучка, выведенного из синхротрона, определяется радиальным размером электронного пучка, угловым разбросом частиц в пучке и многократным рассеянием электронов в мишени, т.е. при выводе в момент времени справа от точки С она будет выше, чем при аналогичной энергии слева.

Непосредственно сбросить пучок на внутреннюю мишень методом уменьшения амплитуды высокочастотного поля в точке В невозможно, т. к. в отличие от точки В*, где энергия и магнитное поле растёт, в точке В магнитное поле уменьшается и, следовательно, частицы не будут сворачиваться внутрь на мишень, а будут разворачиваться наружу, попадая на стенки вакуумной камеры. Поэтому в этот момент электронный пучок следует принудительно наводить на мишень.

2.3. Реализация методики локального искажения орбиты.

Для принудительного наведения ускоренного пучка на внутреннюю мишень использовался метод локального искажения орбиты. Магнит синхротрона "Пахра" состоит из четырёх поворотных магнитов (квадрантов). Каждый квадрант состоит из десяти С-образных магнитных блоков. На спинках С-образных магнитов имеются витки для азимутальной коррекции магнитного поля в момент инжекции. Эти витки и были использованы для реализации вывода пучка малых энергий. Искажение орбиты достигается

тем, что на соответствующие витки подаётся импульсный ток. Для искажения орбиты использовались восемь блоков квадранта. Полярность магнитного поля и искривлённая орбита показаны на Рис.4.

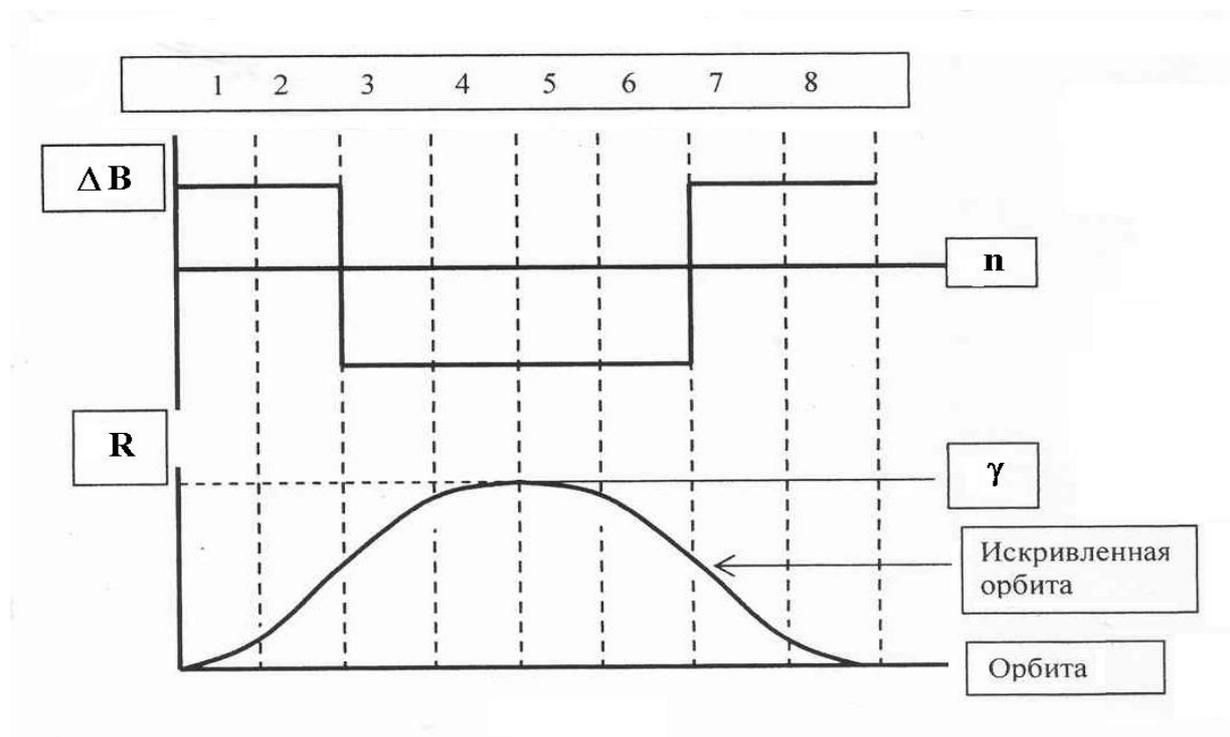
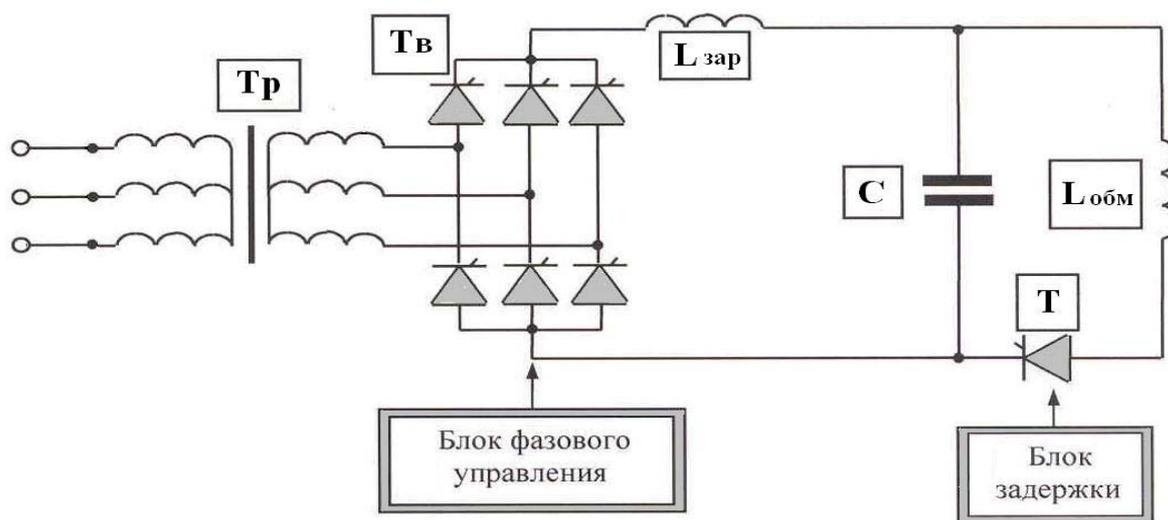


Рисунок 4. Полярность магнитного поля и искривлённая орбита.

По расчетам для искажения орбиты внутрь на расстояние 9 см при энергии пучка $E_0=55$ МэВ необходимо в каждый блок добавить $\Delta B=125$ Гс. При зазоре С - образного магнита 9 см необходимые ампер - витки составят 900 АВ. На спинке С - образного магнита используются 4 витка. Следовательно, ток равен 225 ампер. Была разработана, смонтирована и налажена система питания обмоток, схема которой представлена на Рис.5.

Заряд накопительной емкости С осуществляется от управляемого тиристорного выпрямителя ТВ через зарядный дроссель $L_{зар}$. Разряд емкости на обмотки магнитов — через тиристор Т. Длительность импульса тока составляет 2,5 мс. Изменение энергии выведенного фотонного пучка достигается выбором изменением временного положения импульса тока (точка В на рис.1) относительно момента инжекции электронов из микро-трона-инжектора.

Направление фотонного пучка при наведении ускоренного электронного пучка на мишень методом локального искажения орбиты может несколько отличаться от направления при выводе традиционным способом. Это связано с тем, что мишень находится не строго между 4 и 5 блоками, как показано на Рис. 5.



Тр – трансформатор ТМ 100/10, U – 380/185.

Тв – тиристорный выпрямитель (6 тиристоров Т143 – 400).

С – накопительная емкость (три конденсатора КМ-1-50, С=420мкФ).

Т – тиристор Т143 – 400.

L_{зар} – зарядный дроссель (ФРОС – 800У4, L=48мГн).

L_{обм} – обмотки на спинках магнитов.

Рисунок 4. Блок-схема системы питания обмоток в магните, использующихся для локального искривления орбиты ускоренных в синхротроне электронов.

Для того, чтобы направление пучка не менялось, путем изменения числа витков на отдельных блоках магнита в процессе наладки системы подбиралась необходимая конфигурация искажённой орбиты.

Изображение на рентгеновской пленке фотонного пучка, полученного наведением электронов, предварительно ускоренных до максимальной энергии 550 МэВ методом искажения орбиты, в точке В (при энергии 70 МэВ) показано на Рисунке 3 (5). Интенсивность пучка тормозных гамма-квантов, измеренная методом Гаусс - квантометра,

составляла $\sim 5 \cdot 10^{10}$ фотонов/секунду при интенсивности ускоренных в синхротроне электронов $5 \cdot 10^{11}$ частиц в секунду.

3. Заключение

На электронном синхротроне С-25Р Физического института им. П.Н. Лебедева РАН была предложена и создана система получения тормозного пучка фотонов малых энергий (50-100 МэВ) с высокой степенью направленности. Генерация фотонов проводилась ускоренными электронами на внутренней мишени ($0.1X_0$ вольфрама) ускорителя на спаде магнитного поля. Наведение пучка на мишень осуществлялось методом локального искривления орбиты электронов. Для реализации метода были изготовлены дополнительные обмотки в магните синхротрона и система питания обмоток. Импульс тока подавался на обмотки в момент достижения электронами заданной величины энергии. Система позволяет получать пучок тормозных фотонов с максимальной энергией $E_{\gamma \max}$ в диапазоне 50 – 100 МэВ со средней интенсивностью $\sim 5 \cdot 10^{10}$ квантов/секунду при ускорении $5 \cdot 10^{11}$ электронов в секунду до энергии 550 МэВ.

4. Литература

1. Б.Б. Говорков, А.И. Львов, Е.И. Малиновский, В.И. Сергиенко, Г.А. Сокол, Л.В. Фильков, Е.И. Тамм
Перспективы исследований на пучках синхротрона «Пахра»
Препринт ФИАН, №11, 34 стр. (2002)
2. Башмаков Ю.А., Карпов В.А., Яров А.С.
Динамика электронного пучка в синхротроне с быстрым магнитным полем.
ЖТФ, т.54, в.5, (1984), стр. 905 - 911.