

**А. В. Бондаренко, Н. А. Винокуров, С. В. Мигинский**

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН  
пр. Акад. Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия  
E-mail: A.V.Bondarenko@inp.nsk.su

## **ВЫПУСК ПУЧКА ИЗ СИНХРОТРОНА ЧЕРЕЗ МАГНИТНЫЙ ЭКРАН: МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ И РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ**

Обсуждается новая схема экстракции пучка частиц из циклического ускорителя. Отличительной особенностью представленной схемы является использование магнитных экранов вместо септума. Магнитный экран – это многослойная медно-железная трубка, которая проходит через два центральных дипольных магнита импульсного байпаса. Проводится сравнение численного расчета возмущения магнитного поля магнитным экраном с результатами эксперимента. Приведен расчет эффективности выпуска.

*Ключевые слова:* экстракция пучка, синхротрон, магнитный экран.

### **Введение**

Обычно в современных циклических ускорителях однооборотная экстракция осуществляется с помощью септума и кикера [1; 2]. Септум – это наиболее сложный элемент классической схемы выпуска. Он создает сильное магнитное поле, экранированное тонкой перегородкой (так называемым ножом септума) от орбиты. Есть два основных метода экранирования магнитного поля и соответственно два основных типа септумов.

Септум Ламбертсона содержит нож из ферромагнитного материала (например, железа), ориентированный перпендикулярно магнитному полю. Для питания такого септума подходит генератор низкочастотных импульсов или постоянного тока. Однако если нож септума Ламбертсона насытится, то это приведет к возмущению магнитного поля на орбите синхротрона. Также нож в септуме Ламбертсона – это один из его полюсов, поэтому обмотки есть только вокруг второго полюса. Это приводит к вываливанию краевого поля на орбиту синхротрона.

Септумы второго типа называются импульсными. В них для экранирования орбиты синхротрона от магнитного поля используется скин-эффект. Нож импульсного септума состоит из меди и располагается параллельно магнитному полю. Для питания такого септума необходим короткоимпульсный генератор (с длительностью импульса

несколько десятков микросекунд). Импульсный септум всегда размещают внутри вакуумной камеры, поэтому его конструкция достаточно сложна.

В данной работе обсуждается схема экстракции из циклического ускорителя без использования септума. В ускорителе устанавливается импульсный байпас, состоящий из четырех одинаковых дипольных магнитов с магнитными экранами в двух средних диполях. В качестве магнитных экранов предполагается использовать трубки из чередующихся слоев железа и меди. Данную схему планируется применить для вертикальной экстракции пучка из бустера в накопительное кольцо в проекте Новосибирского источника СИ [3], так как она технически проще и более компактна, чем схемы выпуска с использованием септума.

### **Минимизация возмущения поля магнитным экраном на орбите синхротрона**

Чтобы данная схема была работоспособной, необходим экран импульсного магнитного поля, который бы не искажал поле вокруг себя. В таком экране весь магнитный поток, вытесненный из экранируемой области, должен идти через стенки экрана.

Магнитный поток, вытесненный из экранируемой области, равен произведению магнитного поля в диполе и площади сечения экранируемой области. Экранируемая область постоянна. Найдем магнитное поле

в импульсном диполе, рассмотрев упрощенную электрическую схему импульсного байпаса (рис. 1).

Силовая часть импульсного генератора тока, питающего байпас, представляет собой конденсатор и ключ, байпас – индуктивную нагрузку. Вследствие этого при включении байпаса ток в диполях, поле в них, а значит, и экранируемый поток будут увеличиваться в синусоидальной зависимости от времени.

Поток, проходящий через стенки магнитного экрана, очевидно, зависит от материала, из которого сделан магнитный экран. Численные расчеты, произведенные с помощью программы COMSOL 3.2 (см.: <http://www.comsol.com/>), показали, что одно из возможных решений – это использовать в качестве экрана многослойную трубку из чередующихся слоев ферромагнетика и проводника, например, из железа и меди. Дело в том, что магнитный поток, проходящий через стенки многослойного медно-железного экрана, линейно зависит от времени (рис. 2).

Таким образом, для того чтобы многослойный экран мало возмущал внешнее поле, необходимо согласовать поток, вытесненный из экранируемой области и имеющий синусоидальную зависимость от времени, с потоком, проходящим через стенки экрана и линейно зависящим от времени. Это можно сделать с приемлемой точностью на начальном этапе включения импульсного байпаса в течение первой четверти импульса. Тогда выпуск будет происходить при поле, составляющем примерно 70 % от поля в максимуме импульса, что приведет к увеличению необходимой мощности импульсного генератора, питающего байпас, в 2 раза.

Изготовить многослойный экран можно из медной и железной ленты. Толщину ленты удобнее выбрать около 0,1 мм, потому что лента большей толщины недостаточно гибкая, а использование ленты меньшей толщины приведет к увеличению толщины стенок экрана за счет увеличения числа межслоевых зазоров.

### Измерения возмущения поля магнитным экраном

С целью проверки физической модели и численных методов, которые применялись

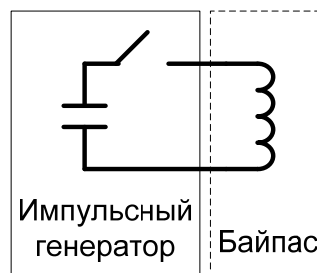


Рис. 1. Упрощенная электрическая схема импульсного байпаса

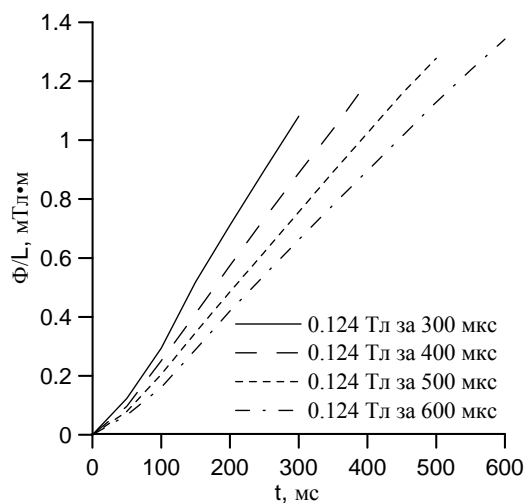


Рис. 2. Поток, проходящий через стенки многослойного медно-железного экрана, в зависимости от времени и скорости роста внешнего магнитного поля

при расчете экранирования магнитного поля многослойным экраном, был изготовлен такой экран и проведены магнитные измерения. Размеры экрана следующие: наружный радиус – 9,5 мм, внутренний – 6 мм, толщина медных слоев – 0,1 мм, толщина железных слоев – 0,08 мм, всего по 12 слоев меди и железа. Межслоевые зазоры получились около 0,05 мм, длина экрана – 200 мм.

Экран был размещен в импульсном дипольном магните с апертурой  $40 \times 40$  мм, длиной железа 100 мм и магнитной длиной 123 мм. Ось экрана параллельна оси магнита посередине между полюсами. Расстояние от оси магнитного экрана до оси дипольного магнита – 5,5 мм (рис. 3).

Измерения проводились с помощью измерительной катушки. Сигнал с катушки пропорционален скорости изменения потока, проходящего через нее. Этот сигнал интегрировался электронным блоком БИИП-4 [4].

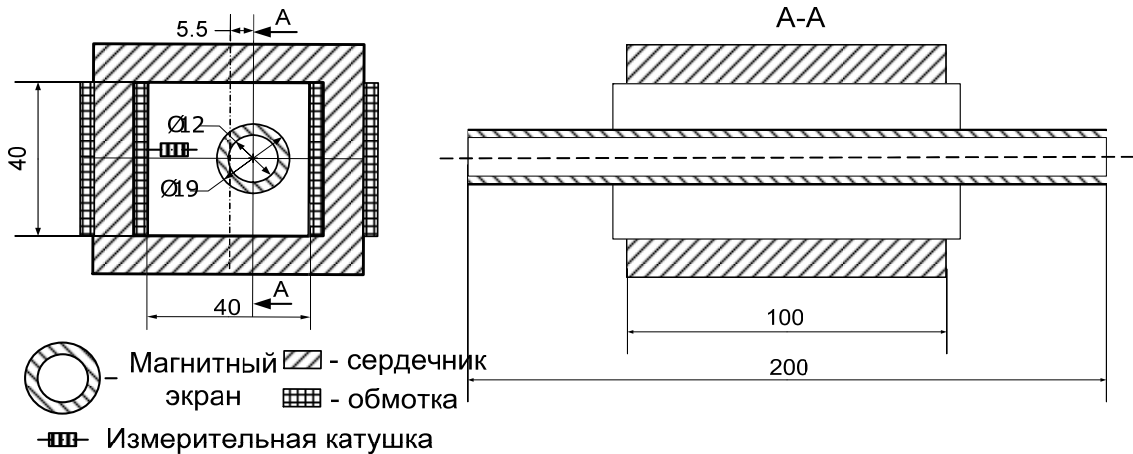


Рис. 3. Схема магнита с установленным магнитным экраном

Интегрированный сигнал пропорционален потоку магнитного поля через катушку, который, в свою очередь, пропорционален проекции магнитного поля на ось катушки.

Измерительная катушка располагалась так, что ее ось была перпендикулярна ведущему полю в диполе и оси экрана. При таком положении катушки проводились измерения в точках на 1 мм выше и ниже серединой плоскости диполя. Из разности результатов измерений вычислялся градиент поля. Так как измерения проводились в относительных единицах, то для нормировки использовались результаты измерений основного поля диполя этой же катушкой в этот же момент времени. Таким образом, результатом измерений был градиент поля, нормированный на основное поле диполя.

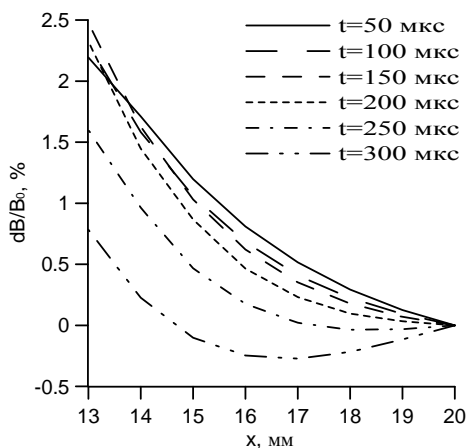


Рис. 4. Возмущение поля в центре диполя ( $dB$ ) в зависимости от расстояния до центра экрана ( $x$ ) и времени с начала увеличения поля ( $t$ ).  $B_0$  — это максимальное магнитное поле в диполе (0,124 Тл), соответствующее моменту выпуска

Сначала были проведены измерения градиента поля в зависимости от амплитуды импульса, подаваемого на дипольный магнит. Измерения проводились в момент времени 280 мкс от начала импульса на расстоянии 18 мм от оси экрана. Ноль градиента наблюдался при увеличении поля в магните до 124 мТл за 300 мкс. При этой скорости подъема поля измерялся градиент поля в зависимости от расстояния до центра экрана и времени с начала увеличения поля. Измеренный градиент интегрировался. Распределение интегрированного градиента  $dB$ , деленного на величину ведущего поля в момент выпуска  $B_0$ , показано на рис. 4.

Так как на динамику частиц в бустере влияет возмущение поля вдоль всей траектории, то проводились измерения не только в центре магнита, но и на краях. Для примера рассмотрим, как зависит возмущение поля от расстояния до центра экрана и времени с начала включения поля на краю железного сердечника диполя (рис. 5). Структура возмущения поля сильно отличается от структуры в центре диполя, величина возмущения меньше, чем в центральной области.

#### Измерение магнитной проницаемости материала экрана

Для проведения численных расчетов возмущения поля нашим экраном необходимо знать кривую магнитной проницаемости железной ленты, из которой изготавливался экран. Для ее измерения из железной ленты было сделано два кольцевых сердечника.

Первый сердечник – из железной ленты длиной 8 м, шириной 71 мм и толщиной 80 мкм. Средний радиус сердечника – 37,5 мм. Эффективная площадь сердечника составила 193 мм<sup>2</sup>. На него была намотана одна катушка в 113 витков с сопротивлением обмотки 0,7 Ом. На получившемся дросселе были проведены измерения магнитной проницаемости при небольших значениях магнитной индукции ( $B \leq 1,1$  Тл). Для этого на него через шунт с сопротивлением 0,4 Ом подавался меандр напряжения с низкоомного генератора с амплитудой 90 В. Напряжение на катушке и падение напряжения на шунте измерялись цифровым осциллографом. При подаче меандра напряжения на дроссель магнитный поток и магнитная индукция в нем увеличивались линейно со временем. Магнитное поле пропорционально току через катушку, а значит, и падению напряжения на шунте. Поэтому кривая зависимости напряжения на шунте от времени пропорциональна кривой намагничивания  $H(B)$ . Зная ее, легко вычислить  $\mu(B)$ .

При значениях магнитной индукции, больших чем 1,1 Тл, не удалось провести измерения с использованием данного дросселя, так как максимальный ток через дроссель был ограничен напряжением генератора, сопротивлением шунта и сопротивлением обмотки.

Второй сердечник необходим для измерения магнитной проницаемости в случае сильного насыщения. Ширина ленты, из которой сделан сердечник, – 10 мм, длина – 5,3 м, толщина – 80 мкм. Средний радиус сердечника – 20,5 мм, его эффективная площадь – 33 мм<sup>2</sup>. На сердечник было намотано две катушки: токовая (188 витков), и измерительная (40 витков). На токовую катушку получившегося трансформатора подавался сигнал с высоковольтного импульсного генератора [5]. Для обеспечения необходимой длительности сигнала к токовой обмотке трансформатора был последовательно подключен соленоид большой индуктивности. Ток, идущий через обмотку, измерялся с помощью датчика тока ACS754SCB-200 (см.: [http://www.allegromicro.com/en/Products/Part\\_Numbers/0754/](http://www.allegromicro.com/en/Products/Part_Numbers/0754/)). Напряжение с измерительной обмотки трансформатора интегрировалось интегрирующей цепочкой и измерялось цифровым осциллографом. Ток через токовую обмотку пропорционален напряженности магнитного

поля  $H$ . Напряжение на измерительной обмотке пропорционально скорости изменения магнитного потока через соленоид, т. е. скорости изменения магнитной индукции  $\dot{B}$ . Следовательно, напряжение с интегрирующей цепочки пропорционально магнитной индукции  $B$ . Поэтому по зависимостям от времени тока через токовую обмотку и напряжения с выхода интегрирующей цепочки можно восстановить зависимость  $\mu(B)$ .

С использованием второго сердечника не удалось провести измерения при значениях магнитной индукции, меньших 2,3 Тл, так как для этого было необходимо снизить амплитуду сигнала с импульсного генератора, т. е. уменьшить начальное напряжение на его конденсаторах. Сделать это было невозможно, так как при этом уменьшался начальный выходной ток, а при меньших значениях тока не открывался тиристор, который является ключом в используемом импульсном генераторе.

На рис. 6 показана кривая магнитной проницаемости железной ленты, из которой изготавливался магнитный экран, восстановленная из результатов обоих измерений.

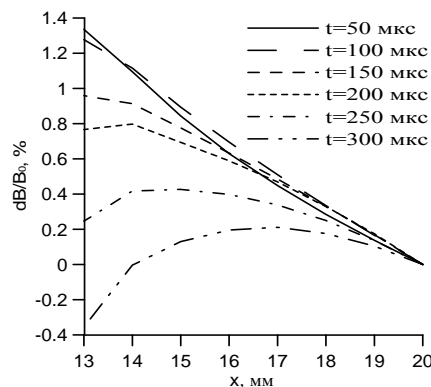


Рис. 5. Возмущение поля на краю сердечника ( $dB$ ) в зависимости от расстояния до центра экрана ( $x$ ) и времени с начала увеличения поля ( $t$ ).  $B_0$  – это максимальное магнитное поле в диполе (0,124 Тл), соответствующее моменту выпуска

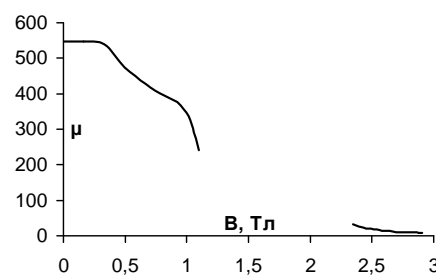


Рис. 6. Измеренная кривая магнитной проницаемости железной ленты

### Сравнение измерений и численных расчетов

Значения  $\mu(B)$  в неизмеренной области аппроксимировались из измеренных значений на краях линейным образом. Используя полученную зависимость  $\mu(B)$  на COMSOL 3.2 смоделирован описанный выше магнитный экран. Для изготовления экрана была необходима железная и медная ленты шириной, равной длине экрана (200 мм). При намотке экрана использовались 3 железные ленты шириной 71 мм, составленные в стык. Между лентами не было электрического контакта, поэтому экранирующие токи вдоль экрана текли только в медных слоях. По этой причине железные слои при расчетах считались непроводящими. Удельное сопротивление меди в расчетах бралось равным  $1,9 \cdot 10^{-8}$  Ом·м.

Были проведены расчеты при разных амплитудах внешнего поля. В случае увеличения внешнего поля до 120 мТл за 300 мкс градиент поля на расстоянии 18 мм от центра экрана в момент времени 280 мкс от начала импульса равен нулю, что согласуется с результатами магнитных измерений.

Результаты численных расчетов возмущения поля таким экраном для этого случая изображены на рис. 7. Измеренная и рассчитанная оптимальные скорости подъема поля отличаются мало. Величина возмущения примерно совпадает с расчетами.

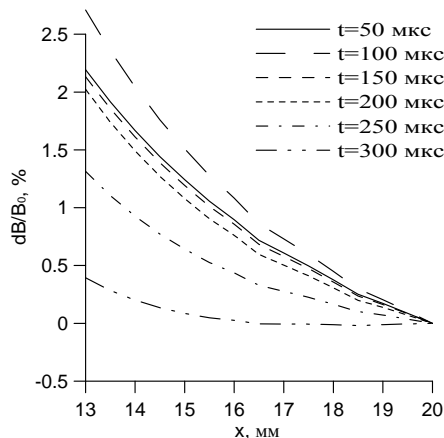


Рис. 7. Результат численных расчетов возмущения поля ( $\delta B$ ) в зависимости от расстояния до центра экрана ( $x$ ) и времени с начала увеличения поля ( $t$ ), при оптимальной скорости его нарастания.  $B_0$  — максимальное магнитное поле в диполе (0,12 Тл), соответствующее моменту выпуска

### Влияние полей возмущения на динамику частиц в бустере

Возмущение поля численно рассчитано на программе COMSOL 3.2, результат расчетов аппроксимирован с помощью разложения по точечным мультиполям вокруг оси магнитного экрана:

$$\delta B_x = \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_{2n}}{(x+iy)^{2n}},$$

$$\delta B_y = \operatorname{Im} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_{2n}}{(x+iy)^{2n}}. \quad (1)$$

Для достижения необходимой точности в разложении поля оказалось достаточно первых трех членов ряда (1). Зависимость коэффициентов разложения  $A_2$ ,  $A_4$  и  $A_6$  от времени была аппроксимирована следующими полиномами:

$$A_2 = 0,1177t^6 - 0,6139t^5 + 1,2602t^4 - 1,2616t^3 + 0,6881t^2 - 0,1912t,$$

$$A_4 = 0,0612t^4 - 0,2217t^3 + 0,2842t^2 - 0,0018t,$$

$$A_6 = 0,0265t^4 - 0,113t^3 + 0,1496t^2 + 0,0444t,$$

где  $t$  — текущее время (мс), отсчитываемое с начала включения байпаса. Коэффициенты  $A_2$ ,  $A_4$  и  $A_6$  измеряются в Тл·см<sup>2</sup>, Тл·см<sup>4</sup> и Тл·см<sup>6</sup> соответственно.

Протяженность области вдоль орбиты, где расположены магнитные экраны,  $l \approx 1$  м, а  $\beta$ -функции в месте расположения магнитных экранов  $\beta_{x,y} \approx 10$  м. Бетатронные фазы при пролете около экрана малы:

$$\Delta \Psi_{x,y} = \frac{l}{\beta_{x,y}} \approx 0,1.$$

Поэтому при расчетах возмущение поля можно считать сосредоточенным, а его воздействие на пролетающие частицы — нелинейным ударом. Сила удара вычислялась интегрированием выражения (1) с учетом зависимости величины возмущения поля и положения орбиты от времени:

$$\Delta x' = \operatorname{Im} \left\{ \frac{e^{-iL}}{p} \int_0^L \left( \frac{A_2}{(x+d(s)+iy)^2} + \frac{A_4}{(x+d(s)+iy)^4} + \frac{A_6}{(x+d(s)+iy)^6} \right) ds, \right. \\ \left. \Delta y' = -\operatorname{Re} \left\{ \frac{e^{-iL}}{p} \int_0^L \left( \frac{A_2}{(x+d(s)+iy)^2} + \frac{A_4}{(x+d(s)+iy)^4} + \frac{A_6}{(x+d(s)+iy)^6} \right) ds, \right. \quad (2)$$

где  $d$  — расстояние от оси магнитного экрана до центра пучка;  $s$  — расстояние вдоль траектории пучка, отсчитываемое от края диполя;  $L$  — магнитная длина диполей. Траекторию пучка в диполях байпаса можно считать параболой, так как угол отклонения

в магнитах байпаса мал –  $2,1^\circ$ . В двух средних диполях байпаса расстояния от оси экрана до траектории пучка –  $d_1, d_2$  – следующие:

$$d_1 = \frac{0,5L^2 + Lb}{R(t_0)} + \Delta - \frac{0,5L^2 + Lb}{R(t)} + \left( \frac{L}{R(t_0)} - \frac{L}{R(t)} \right) \cdot s + \frac{s^2}{2R(t)},$$

$$d_2 = \frac{1,5L^2 + 2Lb}{R(t_0)} + \Delta - \frac{L^2 + Lb}{R(t)} + \frac{L}{R(t_0)} \cdot s + \frac{s^2}{2R(t)},$$
(3)

где  $b$  – расстояние между магнитными краями диполей, 0,40 м;  $L$  – магнитная длина диполей, 0,53 м;  $\Delta$  – расстояние от траектории пучка до оси экрана при влете в первый магнит в момент экстракции, 0,02 м;  $t$  – текущее время, отсчитываемое с начала включения байпаса;  $t_0$  – время в момент экстракции;  $R(t)$  – радиус кривизны траектории в диполе в зависимости от времени:

$$R(t) = \frac{p}{cB_0 \sqrt{2} \sin\left(\frac{\pi}{4t_0}\right)}.$$

После подстановки (3) в (2) было проведено аналитическое интегрирование. Результат интегрирования – выражение для нелинейного удара, который получают частицы при пролете через байпас. Это выражение чрезмерно громоздко, поэтому здесь не приводится. Оно использовалось при точном расчете влияния возмущения поля на динамику частиц в бустере. Для этого была написана программа на C++ в Microsoft Visual Studio.NET 2003. Оптика бустера считалась линейной, следовательно, один оборот частицы в ускорителе эквивалентен линейному преобразованию ее координат. Расчет проводился методом макрочастиц. Вес частиц считался пропорциональным начальному распределению. В качестве начального распределения частиц бралось гауссовское с установившимся в синхротроне эмиттансом. В каждом измерении фазового пространства  $(x, x', y, y')$  было по 10 возможных координат макрочастиц, соответственно трекинг проводился с 10 000 макрочастиц.

Экстракционный байпас расположен на участке с максимальной  $\beta$ -функцией и  $\alpha = 0$ , поэтому функция начального распределения

частиц симметрична относительно преобразований  $x' \rightarrow -x'$  и  $y' \rightarrow -y'$ . Посмотрим, как преобразуется матрица поворота  $\mathbf{M}$  при таком преобразовании:

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \cos \mu & \beta \sin \mu \\ -\sin \mu / \beta & \cos \mu \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \mu & \beta \sin \mu \\ -\sin \mu / \beta & \cos \mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} \cos \mu & -\beta \sin \mu \\ \sin \mu / \beta & \cos \mu \end{pmatrix}.$$

Матрица  $\mathbf{M}$  преобразовалась в матрицу поворота с набегом фазы бетатронных колебаний за оборот  $-\mu$ . Таким образом, при преобразовании координат  $x' \rightarrow -x'$  и  $y' \rightarrow -y'$  динамика частиц в ускорителе не меняется, но набег бетатронных фаз меняет знак. Следовательно, динамика частиц не зависит от знака  $\mu_{x,y}$ . И поэтому достаточно провести трекинг в диапазоне  $\mu_{x,y}$  от 0 до  $\pi$ .

Трекинг проводился с шагом  $0,01 \cdot 2\pi$ . В результате была найдена зависимость доли потерянных при экстракции частиц от набега бетатронных фаз в синхротроне за один оборот (рис. 8).

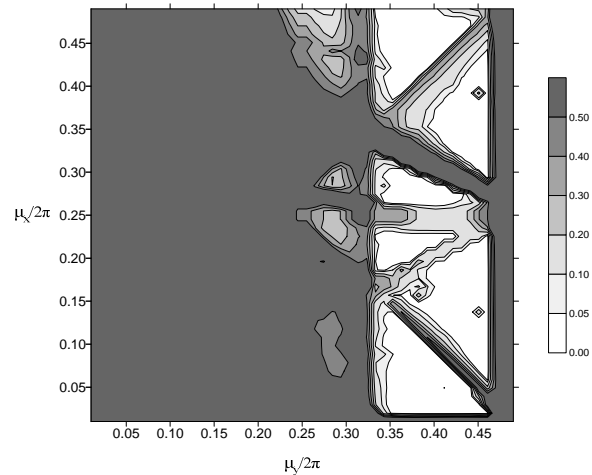


Рис. 8. Зависимость доли потерянных при экстракции частиц от набега бетатронных фаз за оборот

Видно, что самым сильным резонансом является целый, поэтому экстракция при значениях  $\mu_y$  от 0 до  $0,25 \cdot 2\pi$  невозможна. Это соответствует искажению орбиты из-за дополнительного углового отклонения, получаемого пучком при пролете около магнитного экрана. Область, доступная для экстракции, – это полоса между целым и полуцелым резонансами вертикальных бе-

татронных колебаний, которые возникают из-за возмущения поля в вертикально отклоняющем импульсном байпасе. Влияние полужелтого резонанса сказывается при  $\mu_y$  от  $0,45 \cdot 2\pi$  до  $0,5 \cdot 2\pi$ . Ширина полужелтого резонанса определяется величиной дополнительного интегрированного градиента на орбите пучка, приводящего к увеличению  $\beta$ -функции и размера пучка. В окрестности  $\mu_y = 0,4 \cdot 2\pi$  есть несколько достаточно больших областей (около  $0,1 \cdot 2\pi \times 0,1 \cdot 2\pi$ ), в которых возможна эффективная экстракция, поэтому настройка необходимых величин набегов бетатронных фаз за один оборот в синхротроне не должна вызвать серьезных затруднений.

### Заключение

В данной статье приведены результаты магнитных измерений возмущения однородного поля, вызванного многослойным медно-железным магнитным экраном. Результаты измерений показали, что при использовании данного экрана возмущение поля на орбите ускорителя составляет  $1 \div 2$  % от ведущего поля в байпасе. Также был проведен расчет эффективности выпуска. Расчет подтверждает возможность использова-

ния такой схемы для выпуска электронов из циклического ускорителя.

### Список литературы

1. *Chao A. W., Tigner M.* Handbook of Accelerator Physics and Engineering. Singapore: World Scientific, 1999.
2. *Wille K.* The Physics of Particle Accelerators an Introduction. N. Y.: Oxford University Press, 2000.
3. *Бондаренко А. В., Винокуров Н. А., Мигинский С. В.* Схема экстракции пучка для бустера новосибирского источника СИ // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2009. Т. 4, вып. 1. С. 43–46.
4. *Каргальцев В. В., Купер Э. А.* Блок для измерения импульсных параметров БИИП-4 «ЦО640». Препринт ИЯФ № 82-48. Новосибирск, 1982.
5. *Казарезов И. В., Серов А. Ф., Токарев Ю. Ф., Юдин В. Д.* Мощный импульсный источник на тиристорах для питания электрофизических установок. Препринт ИЯФ № 84-12. Новосибирск, 1984.

*Материал поступил в редколлегию 02.02.2009*

A. V. Bondarenko, N. A. Vinokurov, S. V. Miginsky

### BEAM EXTRACTION FROM A SYNCHROTRON THROUGH A MAGNETIC SHIELD: MAGNETIC MEASUREMENTS AND SIMULATION OF EFFICIENCY

A new beam extraction scheme from a synchrotron is put forward. The main difference from other extraction schemes is the use of magnetic shields instead of a septum. The magnetic shield is a multi-layer copper-iron tube, which are located in the central dipole magnets of a pulsed chicane. Numerical simulations and experimental results for the field perturbation by magnetic shield are presented and compared. The calculation of extraction efficiency is presented.

*Keywords:* beam extraction, synchrotron, magnetic shield.