

## РЕЗОНАНСНЫЙ МЕДЛЕННЫЙ ВЫПУСК ИЗ ИОННОГО СИНХРОТРОНА ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ

*М. Ф. Блинов<sup>1</sup>, И. А. Кооп, В. А. Востриков,  
Д. А. Хлыстов, В. С. Елисеев*

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Резонансный медленный выпуск из синхротрона позволяет обеспечить стабильность интенсивности выпущенного пучка в течение достаточно долгого времени. В основе медленного выпуска лежит контролируемое возбуждение резонанса третьего порядка при фиксированных отстройке бетатронной частоты и силе секступольного магнита с постепенным извлечением частиц пучка из стабильной сепаратрисы. В ИЯФ СО РАН разрабатывается ионный синхротрон для широкого спектра технологических применений. Описан метод медленного резонансного выпуска из ионного синхротрона, а также представлены результаты моделирования выпуска с ВЧ-раскачкой.

A resonant slow extraction from synchrotron is the most common use extraction method which can provide relatively stable beams during long time. The principle of slow extraction is based on the intentional excitation of the third-order resonance by controlling the detuning and the sextupole strength with the gradual release of particles from inside to outside stable separatrix. BINP SB RAS develops the ion synchrotron for a wide range of technological applications. The present paper describes the resonant slow extraction from ion synchrotron with betatron oscillations excitation by transverse RF field.

PACS: 29.20.dk; 87.56.bd

### ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ СИНХРОТРОНА

Синхротрон предназначен для накопления и ускорения широкого спектра ионов, от протонов до ионов висмута  $\text{Bi}^{41+}$ . Основные параметры ускорителя представлены в табл. 1. Эскизный вид синхротрона представлен на рис. 1.

Синхротрон имеет зеркально-симметричную структуру, ось симметрии которой проходит через центры прямолинейных промежутков, с нулевой дисперсионной функцией. Один из промежутков предназначен для установки в нем систем впуска-выпуска. В противоположном промежутке расположена установка электронного охлаждения и 6 квадрупольных линз, обеспечивающих на участке охлаждения равные и достаточно большие (около 10 м)  $\beta$ -функции.

---

<sup>1</sup>E-mail: m.f.blinov@inp.nsk.su

Таблица 1. Основные параметры синхротрона

Параметр	Значение
Периметр, м	94,1
Энергия инжекции протоны/ $\text{Bi}^{41+}$ , МэВ/нуклон	7,5/4
Максимальная энергия протоны/ $\text{Bi}^{41+}$ , МэВ/нуклон	700/36
Магнитная жесткость, Тл	4,47
Максимальное поле, Тл	1,6
Бетатронные частоты $Q_x/Q_z$	3,24/3,19
$\beta_{x\text{max}}/\beta_{y\text{max}}$ , м	15,3/25,8
$\eta_{\text{max}}$ , м	5,3
Натуральный хроматизм $\xi_x/\xi_z$	-3,6/-6,3
Критическая энергия $\gamma$	2,86
Коэффициент уплотнения орбит	0,123
Частота обращения протоны/ $\text{Bi}^{41+}$ , МГц	0,4-2,61/0,294-0,862
Интенсивность, протоны/ $\text{Bi}^{41+}$	$10^{11}/10^9$
Эмиттанс пучка при инжекции, $\pi$ см · мрад	6

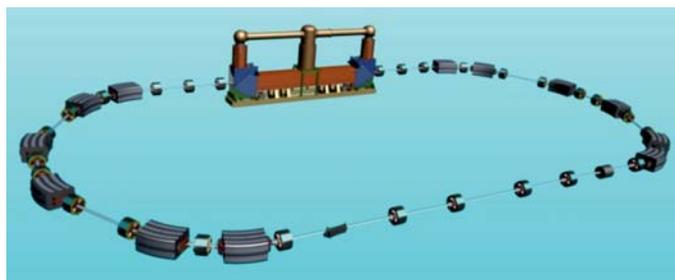


Рис. 1. Эскиз ионного синхротрона

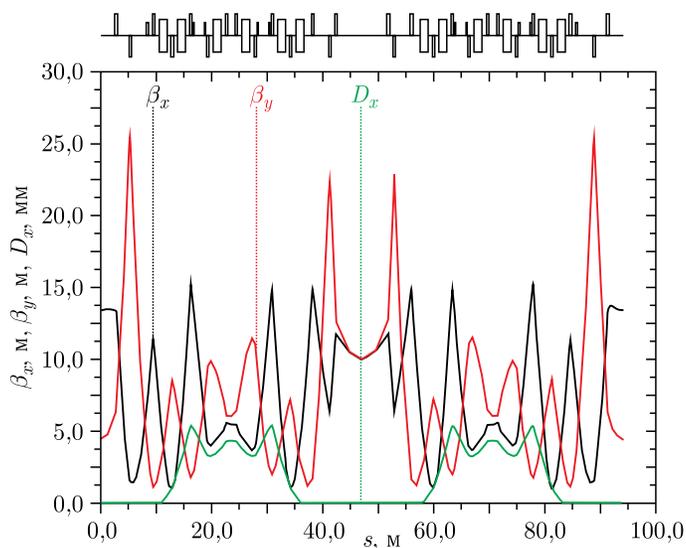


Рис. 2. Оптические функции синхротрона

Особенностью синхротрона является наличие двух режимов выпуска пучка (рис. 2). Однооборотный быстрый выпуск осуществляется на максимальной энергии и выпущенный пучок выводится в перепускной канал. Медленный резонансный выпуск осуществляется в широком диапазоне энергий. Для обоих режимов выпуска используется один и тот же магнитный септум типа Ламбертсона.

### РЕЗОНАНСНЫЙ МЕДЛЕННЫЙ ВЫПУСК

Для медленного выпуска из синхротрона используется одномерный резонанс третьего порядка. Горизонтальная бетатронная частота устанавливается вблизи резонансной с некоторой малой отстройкой. Для создания резонансной гармоники возмущения применяется секступольная линза. При этом возникает сепаратриса, имеющая характерный треугольный вид (рис. 3).

Площадь сепаратрисы, внутри которой частицы совершают устойчивые колебания, в нормализованном фазовом пространстве равна

$$\varepsilon_{\text{стаб}} = \frac{48\sqrt{3}\pi^2}{S^2}(\delta Q)^2, \quad (1)$$

где  $\delta Q$  — отстройка частоты от резонансного значения. Величина  $S$ , в приближении тонкой линзы, выражается следующим образом:

$$S = \frac{1}{2}\beta_x^{3/2} \frac{l_s}{B\rho} \left( \frac{d^2 B_z}{dx^2} \right), \quad (2)$$

где  $\beta_x$  — горизонтальная бета-функции в месте расположения секступоля;  $l_s$  — эффективная длина линзы. При увеличении амплитуды колебаний частицы пучка покидают область устойчивого движения и за конечное число оборотов попадают в зазор электростатического септума. В септуме частицы получают дополнительный удар в радиальном направлении и на этом же обороте выводятся из кольца с помощью магнитного септума.

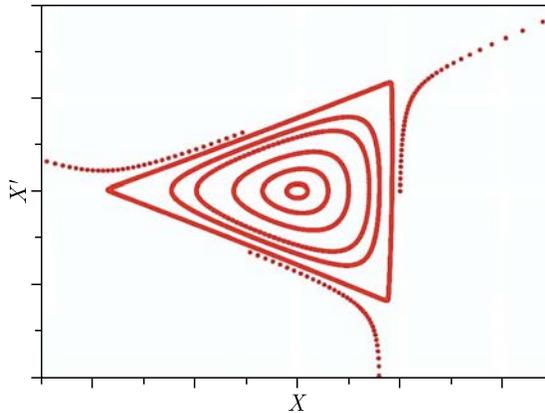


Рис. 3. Фазовые траектории частиц пучка для различных амплитуд колебаний

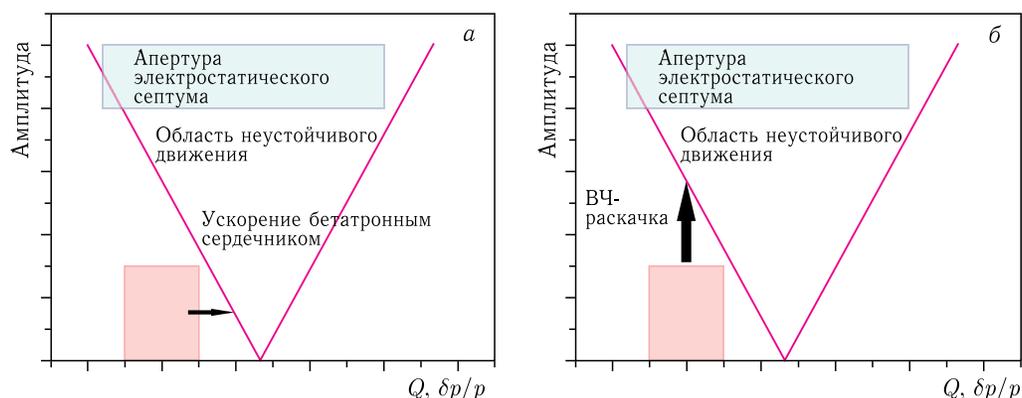


Рис. 4. Механизм медленного выпуска на основе ускорения бетатронным сердечником (а) и на основе увеличения амплитуды бетатронных колебаний ВЧ-раскачкой (б)

Механизм медленного выпуска удобно изображать в переменных: амплитуда колебаний и относительный импульс, известный как диаграмма Стейнбаха. Область устойчивых колебаний в таких параметрах в первом приближении ограничена сверху двумя прямыми линиями. Для покидания частицами пучка области устойчивости используют либо бетатронный сердечник, который медленно изменяет энергию пучка (рис. 4), либо поперечную ВЧ-раскачку для увеличения амплитуды бетатронных колебаний [1]. Для управления однородностью выпуска осуществляется амплитудная модуляция напряжения раскачки. Как правило, в схеме с ВЧ-раскачкой удается получить большую однородность выпуска, чем при использовании бетатронного сердечника за счет более высокой частоты обратной связи. Достаточно высокие требования к однородности выпуска,  $\sim 5\%$  в течение всего выпуска, предопределили механизм выпуска с использованием ВЧ-раскачки.

## СХЕМА ВЫПУСКА ИЗ СИНХРОТРОНА

Резонансная гармоника возмущения создается парой идентичных секступольных линз, которые расположены по краям промежутка для впуска-выпуска в местах с нулевой дисперсионной функцией. За счет набега горизонтальной бетатронной фазы  $\sim 4\pi/3$  между секступолями происходит удвоение величины резонансной гармоники. Нулевая дисперсионная функция в местах расположения секступолей обеспечивает независимое управление хроматизмом и величиной резонансной гармоники.

Непосредственно перед выпуском равновесная орбита в электростатическом и магнитном септумах (рис. 5) локально искажается с помощью специальных бамп-магнитов. Два магнита, разнесенных по фазе бетатронных колебаний на  $\sim \pi$ , используются для бампа орбиты в магнитном септуме, остальные служат для бампа орбиты в электростатическом септуме. После этого частота горизонтальных бетатронных колебаний подводится к резонансному значению  $Q_x = 10/3$ , с отстройкой  $\delta = -0,01$ , и включается ВЧ-раскачка горизонтальных колебаний. Частицы пучка, извлеченные из сепаратрисы, попадают в зазор электростатического септума, где получают гори-

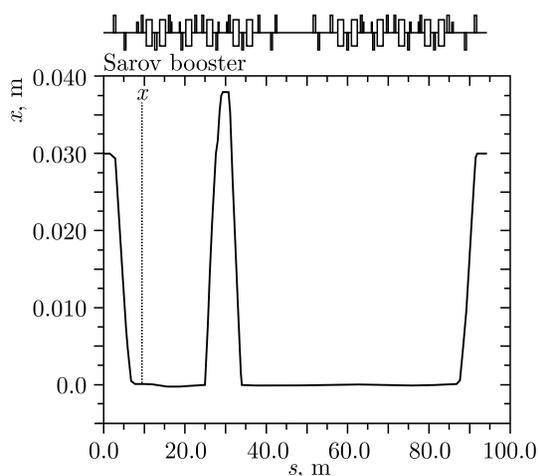


Рис. 5. Искажения равновесной орбиты в электростатическом и магнитном септумах

Таблица 2. Параметры электростатического септума

Параметр	Значение
Угол удара, мрад	1,3
Расстояние от ножа до равновесной орбиты, мм	21
Горизонтальный зазор, мм	7
Длина ножа, мм	300
Толщина ножа, мм	0,1
Максимальное напряжение, кВ	-50
Полная длина септума, мм	500
Потери, %	~ 5

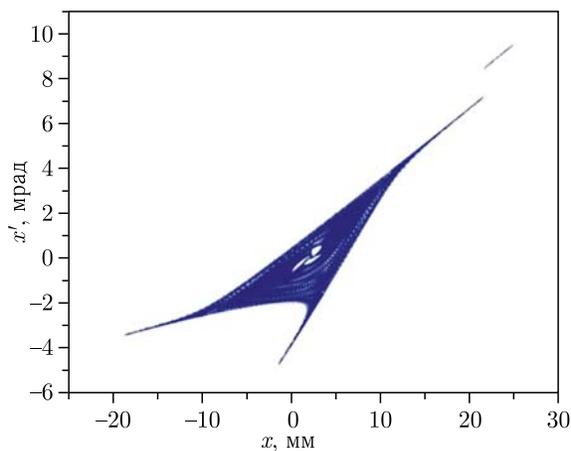


Рис. 6. Фазовый портрет пучка после прохождения электростатического септума

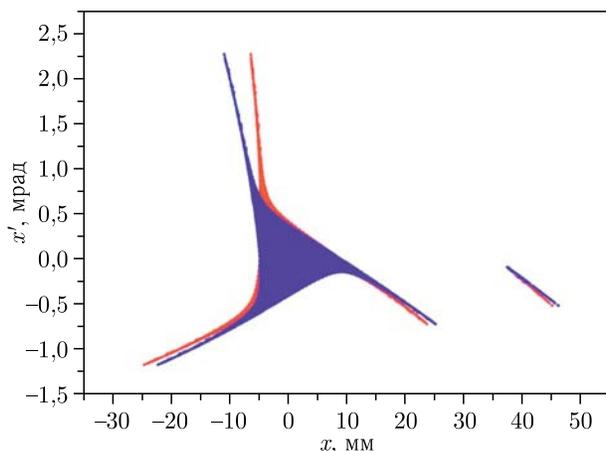


Рис. 7 (цветной в электронной версии). Фазовый портрет пучка на входе в магнитный септум (синий цвет) и на выходе из него (красный)

горизонтальный удар  $\sim 1,3$  мрад и на том же обороте забрасываются за нож магнитного септума типа Ламбертсона. Параметры электростатического септума приведены в табл. 2.

Фазовый портрет пучка после прохождения электростатического септума показан на рис. 6. Видно, что для минимизации потерь пучка на ноже крайне желательно повернуть септум относительно продольной оси на угол  $\sim 8$  мрад. Для этого на внутренней поверхности корпуса септума предусмотрены юстировочные узлы, которые позволяют разворачивать нож относительно вакуумной камеры.

Расстояние по горизонтали между циркулирующим и выпускаемым пучком в магнитном септуме составляет  $\sim 10$  мм при ударе 1,3 мрад (рис. 7). Этого зазора достаточно для размещения ферромагнитного ножа толщиной 5 мм и стенок вакуумных камер.

## ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМЫ МЕДЛЕННОГО ВЫПУСКА

Электростатический септум установлен внутри прогревного вакуумного объема диаметром  $\sim 300$  мм (рис. 8). На корпусе септума имеется механизм для натяжения молибденовой фольги толщиной 100 мкм, которая служит ножом септума. Катод из титана закреплен на двух опорных изоляторах. Корпус септума имеет возможность поворота по горизонтали на угол  $\pm 10$  мрад для минимизации потерь при медленном выпуске.

Для компенсации натурального хроматизма используется 8 секступольных линз, установленных в арках кольца (рис. 9). Также для создания резонансной гармоник используются два секступоля в прямолинейном промежутке. Конструкция хроматического и резонансного секступолей идентична, несмотря на значительную разницу в величинах градиентов. Параметры секступольного магнита приведены в табл. 3.

Выпуск осуществляется в вертикальной плоскости с помощью магнитного септума типа Ламбертсона (рис. 10, табл. 4). Циркулирующий пучок подводится к ножу



Рис. 8. Модель электростатического септума

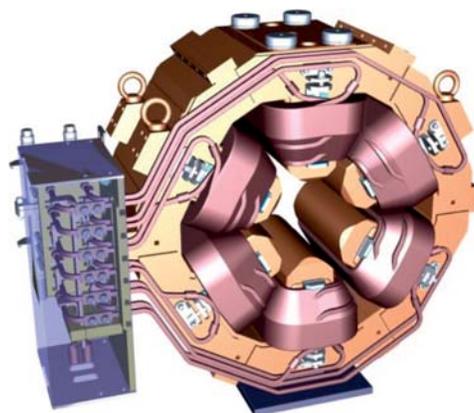


Рис. 9. Модель секступольной линзы

Таблица 3. Параметры секступольной линзы

Параметр	Значение
Число магнитов	8
Максимальный градиент $\partial^2 B_y / \partial x^2$ , Тл/м <sup>2</sup>	177,8
Диаметр вписанной окружности, мм	150
Магнитная длина, мм	292,2
Область хорошего поля, мм	Эллипс 70 × 30
Максимальный ток $I$ , А	300

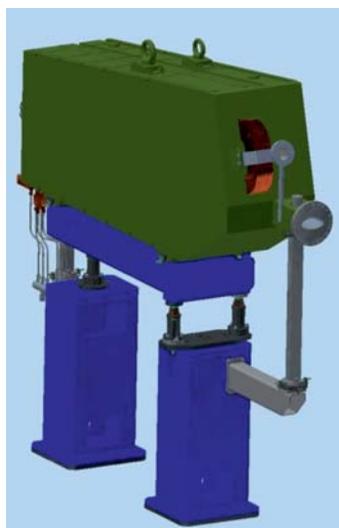


Рис. 10. Модель магнитного септума Ламбертсона

Таблица 4. Параметры магнитного септума

Параметр	Значение
Число магнитов	1
Максимальная магнитная жесткость, Тл · м	4,47
Максимальное поле, Тл	0,7
Интеграл тока, кА · витки	23,04
Угол поворота, °	16
Радиус траектории выпуска, мм	6400
Длина полюса, мм	1711
Магнитная длина, мм	1787

Таблица 5. Параметры бамп-магнитов

Параметр	Бамп-магниты ЭС	Бамп-магниты МС
Число магнитов	5	2
Угол коррекции, мрад	25	7,5
Максимальное магнитное поле, Тл	0,29	0,056
Магнитная длина, мм	282	615
Номинальный ток $I_{ном}$ , А	300	300

септум-магнита с помощью двух специализированных бамп-магнитов (табл. 5) и забрасывается за ферромагнитный нож толщиной 5 мм. Для исключения вывала поля на орбиту циркулирующего пучка на торцах сделаны прямоугольные магнитные экраны.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Особенностью ионного синхротрона, разрабатываемого в ИЯФ СО РАН, является наличие двух режимов выпуска: медленного на резонансе и быстрого однооборотного. В работе представлены результаты расчетов медленного выпуска из синхротрона с высокой эффективностью. Проведена оптимизация оптической структуры синхротрона для минимизации потерь пучка как для медленного, так и для быстрого выпусков. При этом в обоих случаях используется один и тот же выпускной магнитный септум. Также в работе представлены расчеты и предварительная конструкция всех элементов выпуска — электростатического и магнитного септумов, секступольных линз и бамп-магнитов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Balbinot G., Bosser J., Bressi E., Caldara M., Pullia M., Venchi G.* RF-Knockout Extraction System for the CNAO Synchrotron // Proc. of the 1st Intern. Part. Accel. Conf. (IPAC'2010), Kyoto, Japan, May 23–28, 2010. THPEV007. P. 3891.

Получено 18 ноября 2022 г.