

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
Email: A.V.Bondarenko@inp.nsk.su

СХЕМА ЭКСТРАКЦИИ ПУЧКА ДЛЯ БУСТЕРА НОВОСИБИРСКОГО ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Представлена схема экстракции пучка частиц из циклического ускорителя. Ее отличительной особенностью является отсутствие септум-магнитов. Вместо них для вывода из циклического ускорителя в перепускной канал отклоненного кикером пучка планируется использовать магнитные экраны, которые будут размещены внутри центральных дипольных магнитов импульсного байпаса. Схему планируется применить для вертикальной экстракции пучка из бустера в накопительное кольцо в проекте источника синхротронного излучения.

Ключевые слова: экстракция пучка, синхротрон, магнитный экран.

Классическая и новая схемы экстракции из синхротрона

В настоящее время выпуск из синхротрона, как правило, проводится по следующей схеме [1]. Около основной орбиты ускорителя размещается септум-магнит, а на орбите – кикер. При включении кикера пучок смещается таким образом, что проходит через септум, где он отклоняется на необходимый угол и переходит в перепускной канал. По>ля кикера, как правило, недостаточно, чтобы обеспечить значительное отклонение пучка от равновесной орбиты, а размещение септума около неискаженной равновесной орбиты уменьшает апертуру ускорителя. Большая апертура необходима в циклическом ускорителе, например если он используется как бустер и в него инжектируется пучок низкой энергии с большим эмиттансом. В таких случаях сначала с помощью импульсных магнитов орбита подводится к септуму на необходимое расстояние, после чего включается кикер и происходит экстракция (рис. 1). Инжекция в синхротрон проводится аналогичным образом, только при инжекции в накопитель часто используется два кикера: один для изменения траектории инжектируемого пучка и еще один для частичной компенсации влияния первого кикера на накопленный пучок с целью избежать потери пучка на септуме.

Недостатком, такой схемы является наличие технически сложного узла – септум-магнита. В случае инжекции в накопитель

возмущение поля вблизи септум-магнита может ограничивать накопленный ток из-за потери части накопленных частиц под влиянием этого возмущения.

Рассмотрим теперь новую схему экстракции. На орбите синхротрона устанавливается импульсный байпас, состоящий из четырех одинаковых магнитов, с магнитными экранами в двух средних магнитах. В качестве магнитных экранов можно использовать трубки из материалов, экранирующих импульсное магнитное поле, например железа и меди. При включении магнитов орбита пучка подводится к магнитному экрану. После приближения орбиты к экрану на необходимое расстояние включается кикер, который отклоняет траекторию пучка внутрь магнитных экранов второго и третьего магнитов. При этом пучок в байпасе отклоняется только крайними магнитами, а влияние двух средних экранировано. Вследствие этого частицы уходят в перепускной канал (рис. 2). Ближайшим аналогом такой схемы экстракции является выпуск из микротрона через ферромагнитный экран [2]. Для выпуска из синхротрона магнитные экраны не использовались.

Возмущение поля в зазоре магнита магнитным экраном

Основной проблемой рассматриваемой схемы является возмущение однородного поля в зазорах магнитов магнитными экранами. Это приводит к появлению дополни-

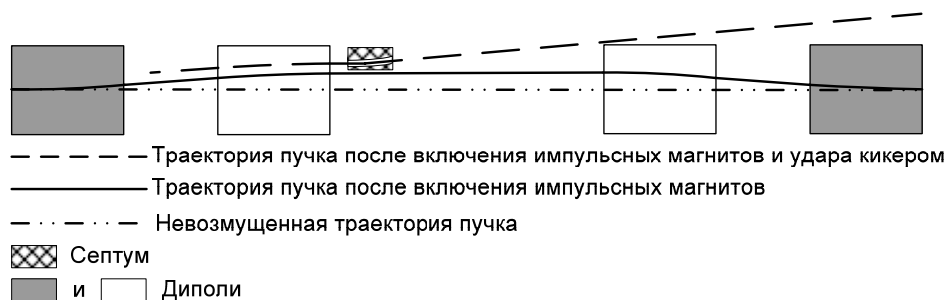


Рис. 1. Классическая схема инжекции и экстракции для циклического ускорителя

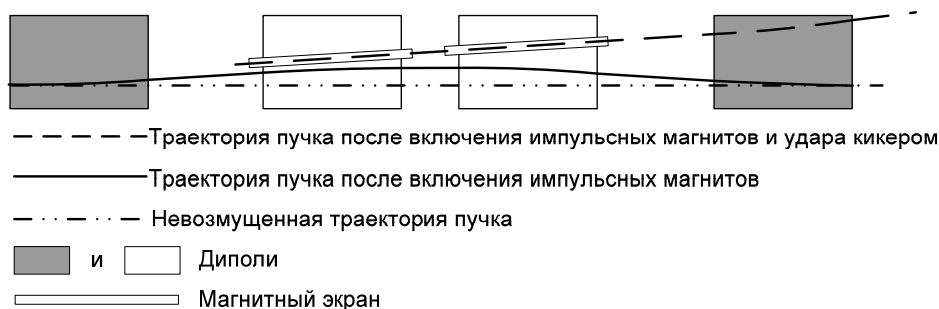


Рис. 2. Новая схема экстракции для циклического ускорителя

тельного градиента на орбите и, как следствие, к зависящему от времени сдвигу бетатронных частот. При большой величине вносимого интегрированного градиента бетатронные частоты могут в процессе экстракции сдвинуться на резонанс, что приведет к неустойчивости бетатронных колебаний в циклическом ускорителе и потере пучка.

Рассмотрим стандартное мультипольное разложение возмущения поля магнитным экраном относительно его оси. Самым большим и дальнедействующим членом этого разложения является первый, диполь-

ный. Его величина пропорциональна разности потока, проходящего через экран, и потока, который проходил бы через область, занятую экраном в невозмущенном состоянии поля. Минимизация этой величины позволит получить существенно более однородное поле в зазоре магнитов.

При включении байпаса поле в его магнитах будет увеличиваться. Если бы магнитное поле не проникало в стенки экрана, а обтекало его, то дипольная компонента возмущения тоже росла бы. Этот рост можно скомпенсировать, если использовать магнитный экран такой, что скорость проникновения магнитного потока в его стенки равна скорости увеличения магнитного потока, который проходил бы через область, занятую экраном, в невозмущенном состоянии поля. Тогда возмущение потока экраном будет близко к нулю, и импульсный магнит с экраном будет работать в режиме компенсации дипольной части возмущения. Добиться этого можно, если использовать в качестве экрана многослойную трубку из чередующихся слоев ферромагнетика и проводника, например, из железа и меди (рис. 3).

Вариант экстракционного байпаса

Для иллюстрации работоспособности предлагаемой схемы был рассмотрен верти-

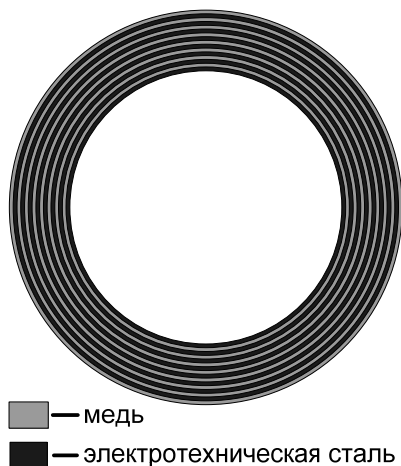


Рис. 3. Многослойный медно-железный магнитный экран

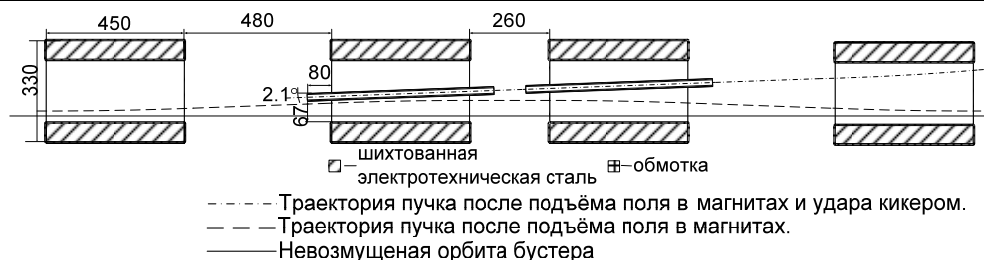


Рис. 4. Байпас с магнитными экранами

кальный выпуск электронов из электронного накопителя (бустера) с энергией 2,2 ГэВ. Такой бустер планируется применить при строительстве нового источника синхротронного излучения [3].

Схема системы выпуска показана на рис. 4. Длина диполей байпаса выбиралась из соображений минимизации величины магнитного поля в момент экстракции и потребляемой мощности. Их магнитная длина составляет 535 мм, т. е. диполи занимают практически все отведенное под байпас место. По проекту бустера через 4 м от начала байпаса на орбите расположена квадрупольная линза. Чтобы обойти ее, выпущенный пучок в этом месте должен отклониться от основной орбиты бустера на 200 мм.

Большую часть пути в байпase экстрагированный пучок пролетает под углом, приобретенным в первом диполе. Угол отклонения в диполях байпаса в момент выпуска, обеспечивающий обход линзы, составляет $2,1^\circ$. Это соответствует полю в момент экстракции 0,5 Тл.

Расстояние между магнитами байпаса выбрано таким, чтобы край магнитного экрана во втором диполе находился на расстоянии больше 30 мм от основной орбиты и не уменьшал апертуру бустера. Поэтому между первым и вторым магнитами байпаса и соответственно между третьим и четвертым расстояния 480 мм. Между вторым и третьим диполями оно выбрано минимально возможным – 260 мм (см. рис. 4).

Внутренний размер экрана определяется условием малой величины потерь пучка при экстракции. При низком давлении остаточного газа горизонтальное распределение частиц определяется влиянием синхротронного излучения на движение электронов [1]. Горизонтальный размер пучка в момент экстракции будет составлять около 2,6 мм, а вертикальный – менее 0,3 мм. Тогда при внутреннем радиусе экрана 8 мм потери малы.

Многослойный медно-железный экран

Поле при наличии различных многослойных экранов было численно рассчитано в двумерном приближении при помощи программы COMSOL 3.2. Были рассмотрены двух-, четырех- и многослойный (25 слоев железа и меди) экраны. Все эти экраны имели внутренний радиус 8 мм, а наружный – 13 мм. Толщины медных и железных слоев экранов оптимизированы для скорости поднятия поля 250 Тл/с. У двухслойного экрана толщина внутреннего железного слоя составляет 3,8 мм, а толщина наружного медного слоя – 1,2 мм; у четырехслойного экрана толщина железных слоев – 0,8 мм, а толщина медных слоев – 1,7 мм; у многослойного экрана толщина железных и медных слоев равна 0,1 мм. При расчете оптической силы возмущения поля на равновесной орбите учитывалось приближение последней к трубчатому экрану. На рис. 5 представлены графики зависимости от времени, вносимой экранами фокусировки.

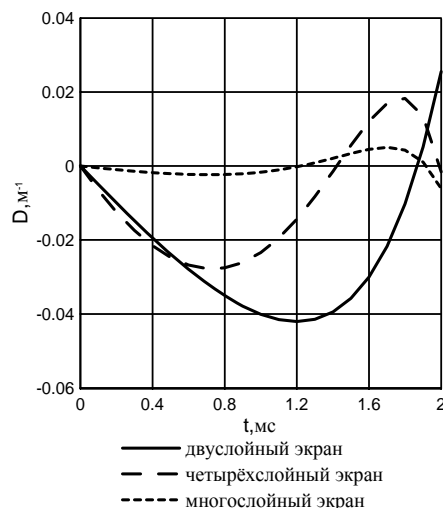


Рис. 5. Дополнительная фокусировка экраном

В случае многослойного экрана оптическая сила возмущения поля минимальна и составляет всего $0,01 \text{ м}^{-1}$ в максимуме, что, допустимо. Распределение возмущения поля снаружи такого экрана показано на рис. 6.

Железные слои в многослойном экране насыщаются последовательно, поэтому плотность магнитного потока распределена в стенках магнитного экрана в форме «ступеньки».

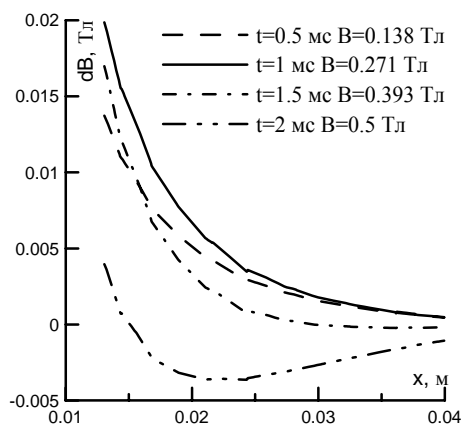


Рис. 6. Возмущение поля многослойным магнитным экраном (dB) в зависимости от расстояния до центра экрана (x), времени (t) и основного поля в магнитах импульсного байпаса (B)

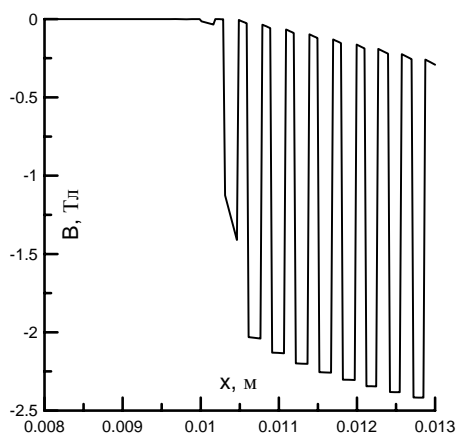


Рис. 7. Распределение магнитного поля (B) в стенках многослойного экрана в зависимости от расстояния до центра экрана (x). Пики магнитного поля соответствуют железным слоям

Область с большой плотностью потока ($\approx 2 \text{ Тл}$) в железе и сильным насыщением железных слоев резко переходит в область с малым магнитным потоком и ненасыщенным железом (рис. 7). Со временем магнитный поток проникает в стенки и эта граница движется. Чтобы обеспечить малую величину поля внутри экрана в момент выпуска, толщина области насыщения железа в стенках экрана в этот момент должна быть меньше толщины стенки. Расчеты с использованием программы COMSOL 3.2 показали, что это достигается при следующих проектных параметрах: внутренний радиус экрана – 8 мм; наружный – 13 мм; увеличение поля – до 0,5 Тл за 2 мс.

Заключение

В данной работе была описана схема экстракции пучка через магнитный экран из синхротрона. Такую схему планируется применить при вертикальной экстракции пучка из бустера в накопительное кольцо в новом источнике синхротронного излучения в ИЯФе. Представленный проект экстракционного байпаса с магнитными экранами обеспечивает необходимый уровень однородности поля в байпасах в момент экстракции. Также к преимуществам представленной схемы стоит отнести отсутствие септум-магнитов и компактность.

Список литературы

1. Chao A. W., Tigner M. Handbook of accelerator physics and engineering. Singapore: World Scientific, 1999.
2. Каница С. П., Мелехин В. Н. Микротрон. М.: Наука, 1969.
3. Antokhin E. I., Gvozdev A. A., Kulipanov G. N. et al. Compact hard X-ray synchrotron radiation source based on superconducting bending magnets // NIM. A. 2007. Vol. 575. Is. 1 + 2. P. 1–6.

Материал поступил в редколлегию 06.10.2008

A. V. Bondarenko, N. A. Vinokurov, S. V. Miginsky
A BEAM EXTRACTION SCHEME FROM A BOOSTER SYNCHROTRON
OF NOVOSIBIRSK SR SOURCE

A beam extraction scheme from a cyclic accelerator is put forward. Its main difference from other schemes of extraction is the use of magnetic shields instead of a septum-magnet. Magnetic shields are located in the central dipole magnets of a pulsed chicane. The proposed scheme will be used for vertical extraction from a booster synchrotron to a storage ring in a new synchrotron radiation source in Novosibirsk.

Keywords: beam extraction, synchrotron, magnetic shield.