

# РАЗРАБОТКА МАГНИТНОГО КОРРЕКТОРА ДЛЯ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ПОЛОЖЕНИЯ ПУЧКА РЕЗОНАНСНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ БЕТА-8

*И. А. Юрьев, Л. Е. Поляков, Н. Н. Курапов, А. М. Опекунов, А. В. Тельнов, Э. А. Шаравин, А. Н. Шейн, И. В. Шорилов*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

В РФЯЦ-ВНИИЭФ ведутся работы по созданию резонансного ускорителя электронов БЕТА-8 [1], предназначенного для генерации электронного пучка со средней энергией ускоренных электронов от 1,5 до 7,5 МэВ и средней мощностью пучка до 300 кВт. Частью ускорителя, в которой происходит набор энергии электронами, является коаксиальный полу-волновой резонатор, работающий на типе колебаний  $T_1$  при частоте 100 МГц.

Принцип действия установки основан на многократном прохождении электронного пучка через ускоряющий резонатор, как показано на рис. 1. ВЧ инжектор электронов генерирует электронные сгустки с энергией 100 кэВ, частотой следования от 0.01 до 100 МГц и длительностью 1 нс, которые поступают на вход коаксиального резонатора. Ускорение электронов в резонаторе происходит на уровне медианной плоскости, где полностью отсутствует магнитная компонента ВЧ поля. Электронный пучок за один проход через резонатор увеличивает энергию на ~1,5 МэВ. Возвращения электронов в резонатор для повторного ускорения обеспечивают дипольные магниты, расположенные снаружи резонатора. Максимальная проектная энергия 7,5 МэВ достигается

после пятикратного прохождения электронного пучка через резонатор. В процессе ускорения средняя энергия электронов приобретает ряд дискретных значений, из которых рабочими являются пучки с энергиями 1,5; 4,5 и 7,5 МэВ. После ускорения, в зависимости от выходной энергии, траектория электронного пучка пролегает в одном из трех каналов транспортировки, которые на конечном участке объединяются в один общий выводной канал.

Высокая мощность и сложность траектории электронного пучка накладывают высокие требования на точность проводки пучка, чтобы минимизировать или полностью исключить потери электронов в стенках резонатора и каналов транспортировки. Отклонение траектории электронного пучка от расчетной может быть вызвано разными причинами: погрешностью юстировки элементов тракта проводки пучка, отклонением от расчетного распределения магнитного поля в поворотных магнитах, взаимным влиянием близко расположенных поворотных магнитов. Поэтому, систему транспортировки пучка необходимо оснастить дополнительными магнитами (магнитными корректорами), которые обеспечат угловую коррекцию электронного пучка. В данной работе приведены разработка конструкции и результаты расчетов магнитного корректора.

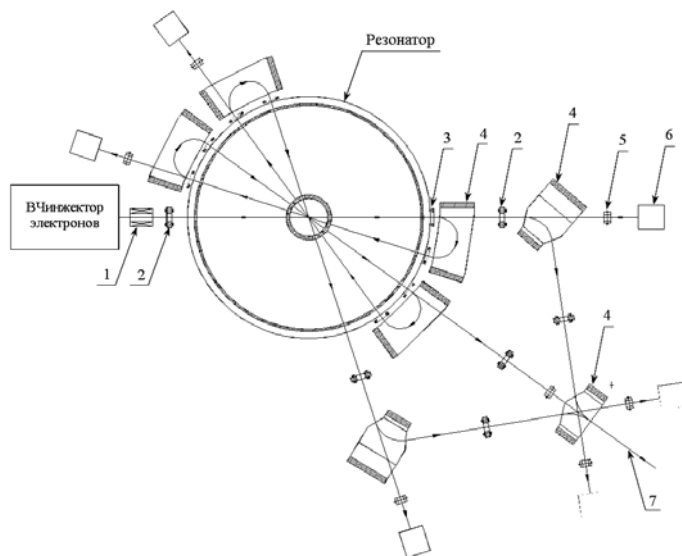


Рис. 1. Схема ускорения: 1 – соленоид; 2 – магнитная квадрупольная линза; 3 – магнитный корректор; 4 – поворотный дипольный магнит; 5 – монитор положения пучка; 6 – поглотитель пучка; 7 – выводной канал

## Назначение магнитного корректора

Магнитные корректоры [2] работают совместно с мониторами положения пучка (рис. 1) и являются составными элементами системы диагностики пучка. Основное назначение системы диагностики – обеспечить первичную проводку пучка с малым средним током (менее 40 мкА) по заданной траектории. Перед каждым поворотом пучка осуществляется мониторинг и, при необходимости, коррекция его траектории с помощью соответствующего магнитного корректора. После этого включается поворотный магнит и процедура повторяется на следующем участке канала проводки. После успешной проводки пучка через выводной канал (рис. 1) средний ток пучка поднимается до номинального значения (40 мА).

Магнитные корректоры будут размещаться в зазорах между корпусом резонатора и поворотными магнитами (рис. 1). Ввиду ограниченного пространства, магнитный корректор должен иметь компактные размеры и при этом обеспечивать одновременное отклонение пучка в двух плоскостях (горизонтальной и вертикальной).

### Конструкция и режимы работы магнитного корректора

Магнитный корректор (рис. 2) представляет собой электромагнит с замкнутым магнитопроводом (1) квадратной формы. На каждой стороне сердечника расположены одинаковые обмотки питания (2). Магнит такой конструкции, в зависимости от способа включения обмоток, может выполнять функции как отклоняющего магнита (дипольный режим), так и квадрупольной линзы (квадрупольный режим).

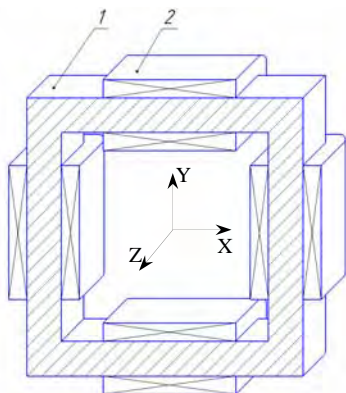


Рис. 2. Общий вид магнитного корректора:  
1 – магнитопровод; 2 – обмотка питания

На рис. 3,а показана схема включения обмоток питания для работы магнита в дипольном режиме. При включении вертикальных обмоток магнитный корректор отклоняет электронный пучок в горизонтальной плоскости. При включении горизонтальных обмоток – в вертикальной плоскости. При подаче питания на обе пары обмоток пучок можно отклонять в произвольном направлении.

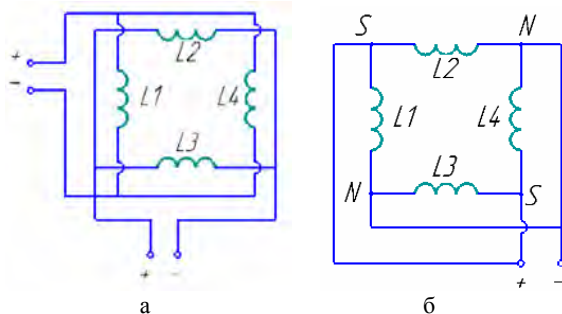


Рис. 3. Схемы включения обмоток магнита: а – дипольный режим, б – квадрупольный режим

На рис. 4 показано направление векторов магнитного поля при включении магнита в режиме горизонтального и вертикального отклонения электронного пучка (дипольный режим).

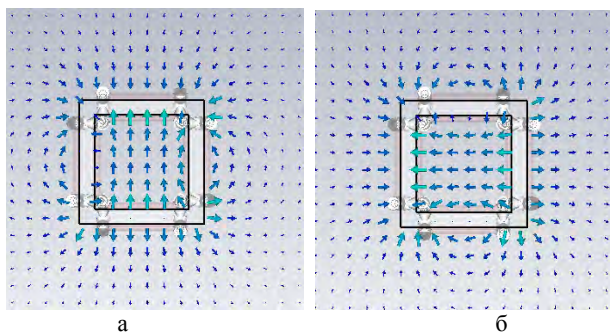


Рис. 4. Направление векторов магнитной индукции при включении магнита в дипольном режиме: а – режим горизонтального отклонения, б – режим вертикального отклонения

Для использования магнита в качестве квадрупольной линзы обмотки питания необходимо включить как показано на рис. 3,б. При этом, в зависимости от полярности питания, линза будет фокусировать пучок в горизонтальной или вертикальной плоскостях и расфокусировать, соответственно, в вертикальной или горизонтальной плоскостях. Направление векторов магнитного поля квадрупольа показано на рис. 5.

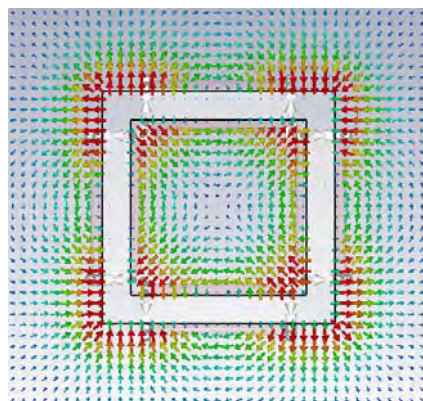


Рис. 5. Направление векторов магнитной индукции при включении магнита в режиме квадрупольной линзы

## Расчет магнитного корректора

Исходные данные для магнитного корректора были следующими:

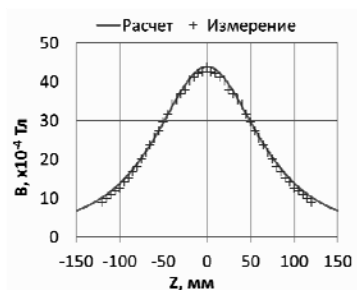
1) Магнитный корректор должен обеспечивать компенсацию углового отклонения пучка от расчетной траектории до  $0,5^\circ$  при максимальной энергии электронов 7,5 МэВ;

2) Габаритные размеры магнита не должны превышать 200 мм в поперечнике и 50 мм в продольном направлении (по пучку);

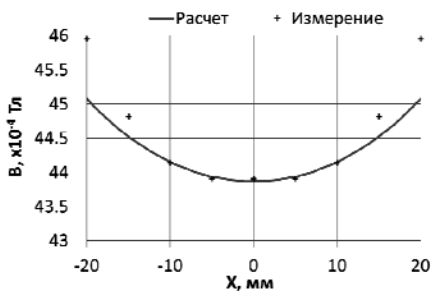
3) Внутренняя апертура по обмоткам должна быть не менее 110 мм;

4) Магнит должен работать в условиях естественного воздушного охлаждения.

По исходным данным была разработана трехмерная модель магнита и рассчитаны распределения магнитного поля для дипольного и квадрупольного режимов. Результаты расчетов для дипольного и квадрупольного режимов показаны, соответственно, на рис. 6 и рис. 7.



а



б

Рис. 6. Распределения индукции магнитного поля магнита в дипольном режиме: а – по оси Z (направление пучка), б – по оси X (плоскость магнита)

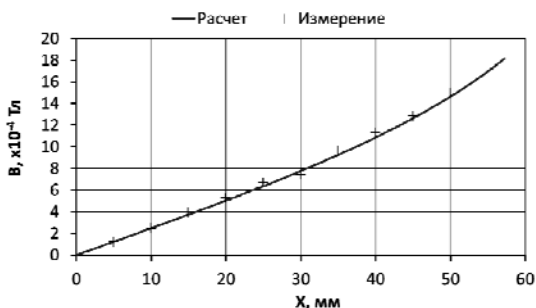


Рис. 7. Распределения индукции магнитного поля магнита в квадрупольном режиме вдоль оси X от центра магнита до обмотки

После получения распределения магнитных полей была рассчитана динамика пучка с энергией 7,5 МэВ, проходящего через центр плоскости магнита. На рис. 8 показана траектория пучка, проходящего через магнит, включенный в дипольном режиме. А на рис. 9 и 10 изображены поперечные сечения электронного пучка на расстоянии 1000 мм от корректора.

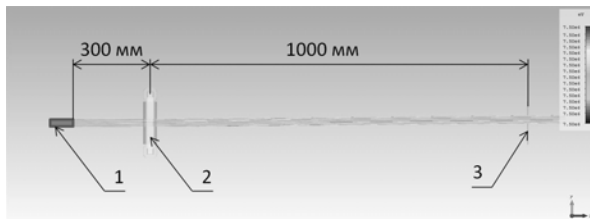


Рис. 8. Траектория электронного пучка при работе магнита в дипольном режиме: 1 – инжектор, 2 – магнит, 3 – монитор частиц

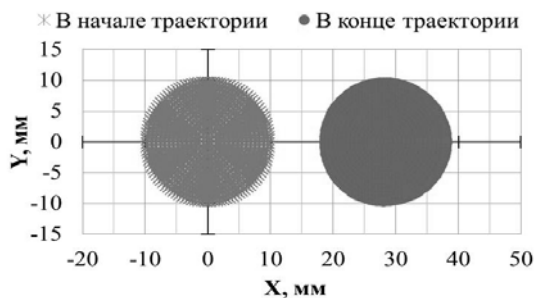


Рис. 9. Изображение поперечного сечения пучка в начале и конце расчетной траектории при работе корректора в дипольном режиме

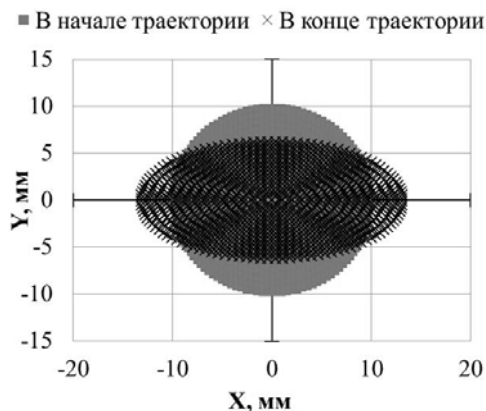


Рис. 10. Изображение поперечного сечения пучка в начале и конце расчетной траектории при работе корректора в квадрупольном режиме

## Заключение

Разработан компактный и не требующий принудительного охлаждения магнит для системы диагностики электронного пучка ускорителя БЭТА-8. Магнит, в зависимости от способа включения обмоток, может выполнять функции как отклоняющего магнита (дипольный режим), так и квадрупольной линзы (квадрупольный режим).

Для разработки указанного магнита была создана его полномасштабная компьютерная модель и проведен расчет ее магнитных параметров.

Проведены расчеты динамики электронного пучка при работе магнита в дипольном и квадрупольном режимах.

Разработана КД и изготовлен макет магнита. Проведены измерения магнитного поля изготовленного магнита в дипольном и квадрупольном режимах. Измеренные распределения магнитной индукции оказались в хорошем соответствии с расчетными данными.

В настоящее время макет магнитного корректора установлен на измерительном стенде ВЧ инжектора ускорителя БЕТА-8 [3] для коррекции пучка и калибровки монитора положения пучка.

## Литература

1. Гладышев Е. Н., Гордеев В. С., Завьялов Н. В., Кузнецова Н. Н. и др. Состояние работ по проекту создания электронного резонансного ускорителя непрерывного действия БЕТА-8. // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Сер. Научно-исследовательское издание. 2015. Вып. 20. Ч. 1. С. 184–193.

2. Бенфорд А. Транспортировка пучков заряженных частиц. – М.: Атомиздат, 1969.

3. Опекунов А. М., Завьялов Н. В., Кузнецов В. В., Курапов Н. Н. и др. Экспериментальная отработка проводки электронного пучка ВЧ инжектора для резонансного ускорителя БЕТА-8 // Международная конференция «XVIII Харитоновские тематические научные чтения. Проблемы физики высоких плотностей энергии». Тезисы. 2016. С. 52.