

ОТКЛОНЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ С РЕГУЛИРУЕМЫМ УГЛОМ ОТКЛОНЕНИЯ ПУЧКА

В. С. Александров¹, А. С. Петухов, А. В. Тузиков, А. А. Фатеев

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Рассмотрена отклоняющая система, состоящая из двух модулей дипольных постоянных магнитов. В каждом модуле намагничивающими элементами являются постоянные неодимовые (NdFeB) магниты. Конструкция позволяет регулировать угол отклонения пучка (как величину, так и направление) вращением модулей друг относительно друга. Возможное применение — корректор траектории пучка. Предложенный вариант позволяет уменьшить габариты корректора при заданном интеграле поля, снизить эксплуатационные расходы и существенно повысить надежность.

The bending system consisting of two modules of dipole permanent magnets is considered. In each module the magnetizing elements are permanent neodymium (NdFeB) magnets. The design allows one to regulate a beam deflection angle (both the value and the direction) by rotation of modules from each other. Possible application is corrector of the beam trajectory. The offered option allows one to reduce the corrector's dimensions at the set field integral, to cut operational costs and essentially increase reliability.

PACS: 29.27.Eg; 29.20.db

ВВЕДЕНИЕ

Магнитные дипольные корректоры достаточно широко распространены в ускорительной технике. Они применяются как непосредственно для настройки траектории пучка в ускорителях, так и в каналах транспортировки пучков. К классу дипольных корректоров мы будем относить магниты относительно небольшой длины, когда поперечное смещение пучка на длине магнита можно считать незначительным. Конструкции магнитов могут быть разнообразными. Для примера на рис. 1 показаны 3D-модели двух распространенных типов дипольных корректоров с токовыми обмотками.

Очень часто дипольные корректоры используются парами со взаимно-перпендикулярными векторами магнитного поля, что позволяет отклонять пучки в любом направлении.

Достоинства и недостатки дипольных магнитов с токовыми обмотками достаточно очевидны. Основное их преимущество — простота регулировки отклоняющего магнитного поля. К недостаткам можно отнести необходимость наличия стабилизированного, силовоточного источника питания, значительный нагрев обмоток и, как следствие, потребность в системе охлаждения. Все это повышает стоимость, снижает надежность и сроки эксплуатации.

¹E-mail: aleks@jinr.ru

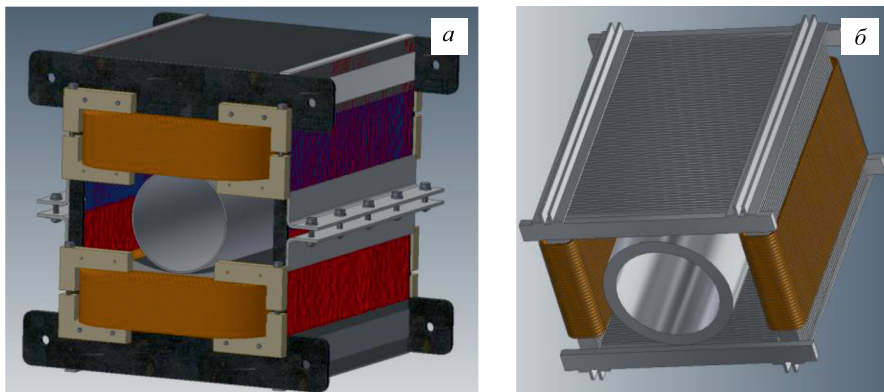


Рис. 1. Дипольные магниты: согласное (а) и встречное (б) включение обмоток

Этих недостатков лишены системы с постоянными магнитами, но в этом случае приходится решать вопросы эффективной регулировки суммарного вектора воздействия на пучок по амплитуде и направлению. Дополнительным стимулом к поискам приемлемых технических решений в таком подходе является то, что в последние годы появились достаточно дешевые постоянные магниты с большой величиной магнитной индукции.

1. КОРРЕКТОР С ДВУМЯ ВРАЩАЮЩИМИСЯ МОДУЛЯМИ

Рассматривается возможность создания отклоняющей системы, состоящей из двух идентичных модулей на постоянных магнитах (МПМ). Вращением модулей друг относительно друга можно регулировать как интеграл поля, так и направление угла отклонения пучка. Интеграл поля в любом заданном направлении может меняться в пределах $0-2L_1B_1$, где B_1 и L_1 — поле и эффективная длина одного модуля. В перпендикулярном же направлении поле будет знакопеременным вдоль траектории пучка при интегральном значении, близком к нулю.

Возможное применение такого типа отклоняющих систем — альтернатива дипольным корректорам траектории пучка в каналах транспортировки.

Основные параметры дипольного корректора

Параметр	Значение
Номинальное магнитное поле, Тл	0,114
Магнитный зазор, мм	70
Эффективная длина, мм	465
Угол поворота (при $B\rho = 45$ Тл·м), рад	0,00118
Интеграл поля вдоль траектории $\int B dl$, Тл·м	0,053
Горизонтальный размер области хорошего поля, мм	± 35
Вертикальный размер области хорошего поля, мм	± 25
Качество интеграла поля $\Delta \int B dl / \int B dl$	$\leq \pm 4 \cdot 10^{-3}$
Масса магнита в сборе, кг	460

Например, в проекте комплекса NICA [1] предусмотрен канал для прикладных экспериментов. Для этих целей предполагается использовать пучок Au^{+79} из нуклотрона с энергией около 1 ГэВ/нуклон (магнитная жесткость ≈ 15 Тл·м). При поле $B_1 = 0,1$ Тл и длине одного модуля магнита 100 мм угол отклонения составит до 1,3 мрад. Альтернативный вариант корректора дает возможность уменьшить его габариты и количество корректоров. Не требуются также шкафы систем питания с импульсными генераторами или источниками постоянного тока, системой охлаждения и силовые кабели питания.

Для примера в таблице приведены характеристики дипольных корректоров в канале транспортировки нуклотрон–коллайдер.

2. МЕТОД РАСЧЕТА

Выбор распределения постоянных магнитов в поперечном сечении модулей, обеспечивающего заданную однородность в области рабочего поля, производился по результатам расчетов в двумерном приближении с помощью пакета POISSON [2]. Постоянный магнит заменялся парой плоских проводников (шин) со встречными токами, расположенных по его торцам. Такой подход известен и дает результаты, хорошо совпадающие с точным расчетом.

Таким же образом и составной магнит в расчетах заменялся парой проводников со встречными токами (рис. 2).

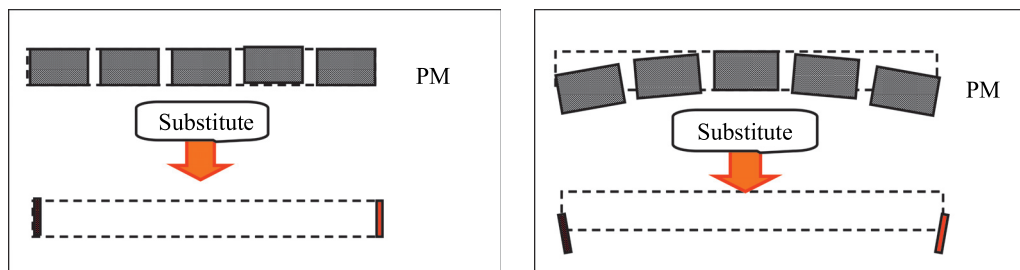


Рис. 2. Варианты замены составного постоянного магнита шинами

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

При проведении расчетов предполагалось, что модуль в поперечном сечении представляет собой пару арок, заключенных в кожух из стали 10. Арки составлены из постоянных магнитов с поперечным сечением 10×20 мм. Радиус кривизны арки и форма кожуха выбирались из требования, чтобы качество поля $\Delta B/B$ было не хуже $\pm 5 \cdot 10^{-2}$ в области $\varnothing 80$ мм.

На рис. 3 показано поперечное сечение модуля с радиусом кривизны арок 70 мм, составленных (в поперечном сечении) из пяти постоянных магнитов каждая. На рис. 4 и 5 представлены распределения магнитного поля в рассматриваемой области.

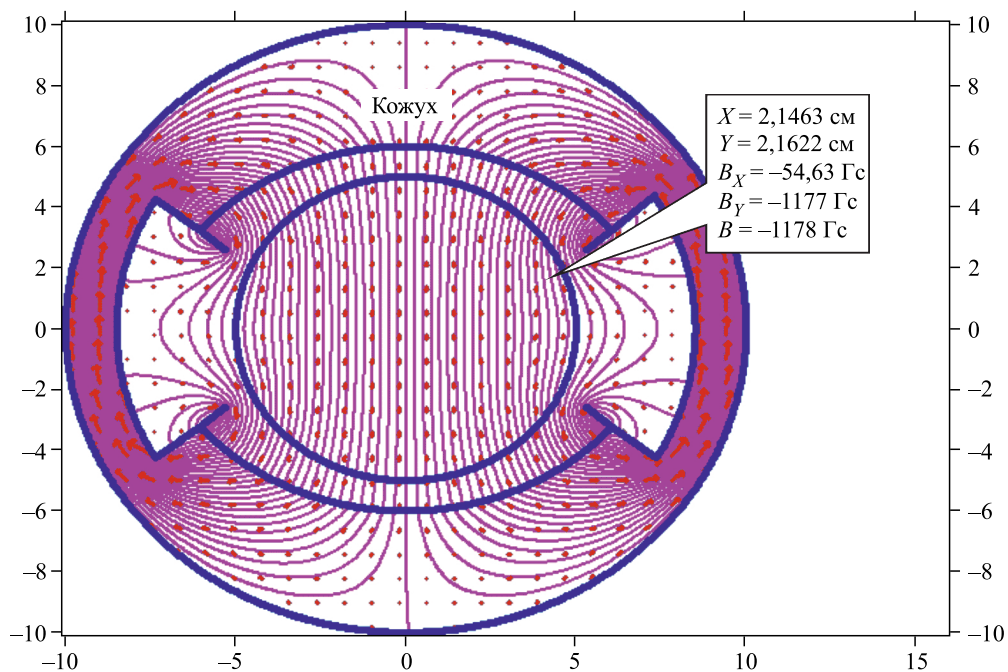


Рис. 3. Выбранная конфигурация. В отдельном окне приведены координаты точки и значения поля вблизи краев магнита (токовых шин)

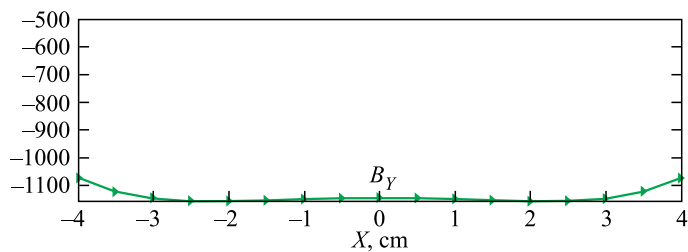


Рис. 4. Распределение компоненты B_Y магнитного поля по горизонтали вдоль прямой, проходящей через центр

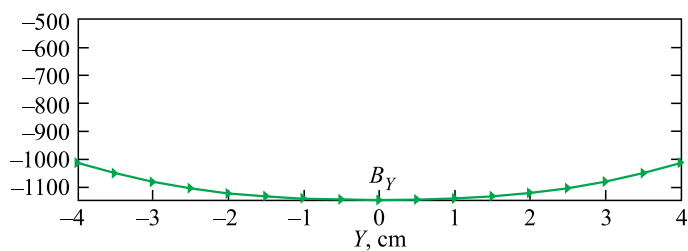


Рис. 5. Распределение компоненты B_Y магнитного поля по вертикали вдоль прямой, проходящей через центр

4. МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА МАКЕТЕ КОРРЕКТОРА

При изготовлении макета корректора были использованы неодимовые (NdFeB) прямоугольные постоянные магниты размерами $40 \times 20 \times 10$ мм с полем на поверхности 2,5 кГс. Внешний вид одного из двух дипольных магнитных модулей макета и элементы измерительного оборудования показаны на рис. 6 и 7 соответственно.

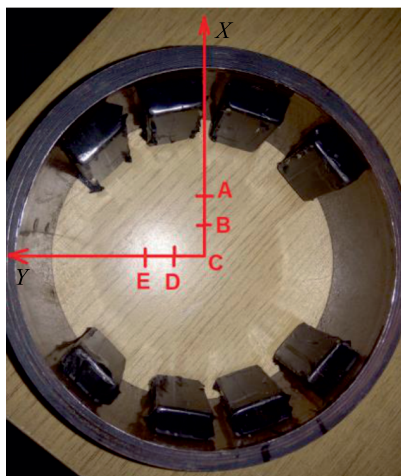


Рис. 6. Магнитный модуль макета и положения продольных осей: С — центральная ось модуля; В — смещенная вверх на 1 см; А — вверх на 2 см; D — влево на 1 см; Е — влево на 2 см

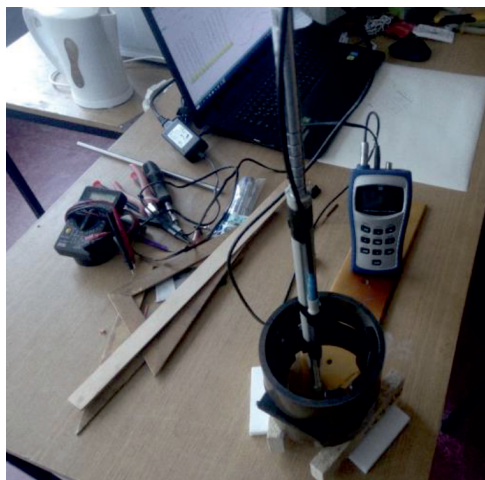


Рис. 7. Измерительное оборудование: два модуля, разделенные зазором 1 см, датчик Холла с измерительным блоком, устройства для перемещения датчика по трем координатам

Измерения проводились в четыре этапа с последовательным угловым смещением модулей относительно вертикальной оси по 30° в противоположные стороны, что иллюстрируется рис. 8–11. Каждый этап — в пяти осях с шагом 10 мм. Измерения проводились при перемещении датчика вдоль продольных осей для двух составляющих магнитного поля B_X и B_Y . Результаты измерений представлены ниже на рис. 12–19 (ось OX направлена вертикально).

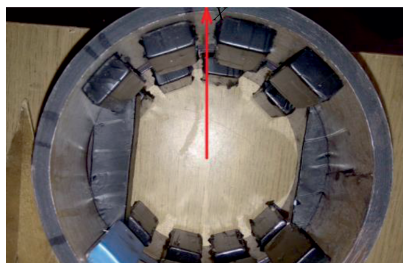


Рис. 8. Модули без углового смещения

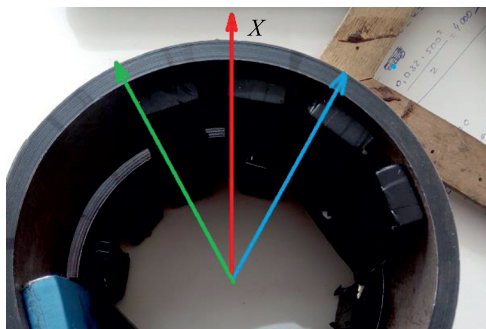


Рис. 9. Модули с угловым смещением $\pm 30^\circ$

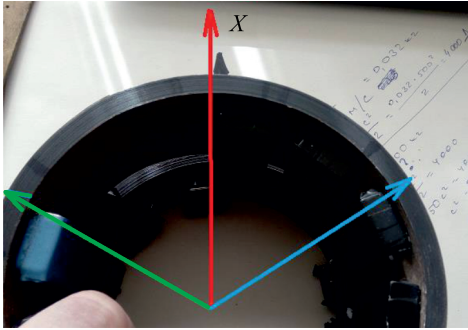


Рис. 10. Модули с угловым смещением $\pm 60^\circ$

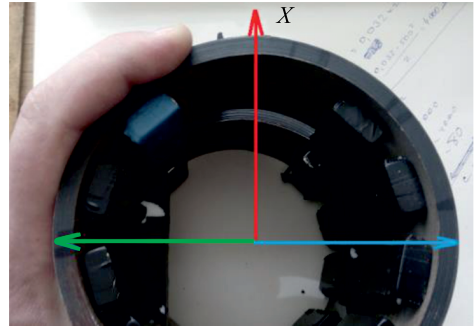


Рис. 11. Модули с угловым смещением $\pm 90^\circ$

1. Направления магнитных силовых линий совпадают с осью OX :

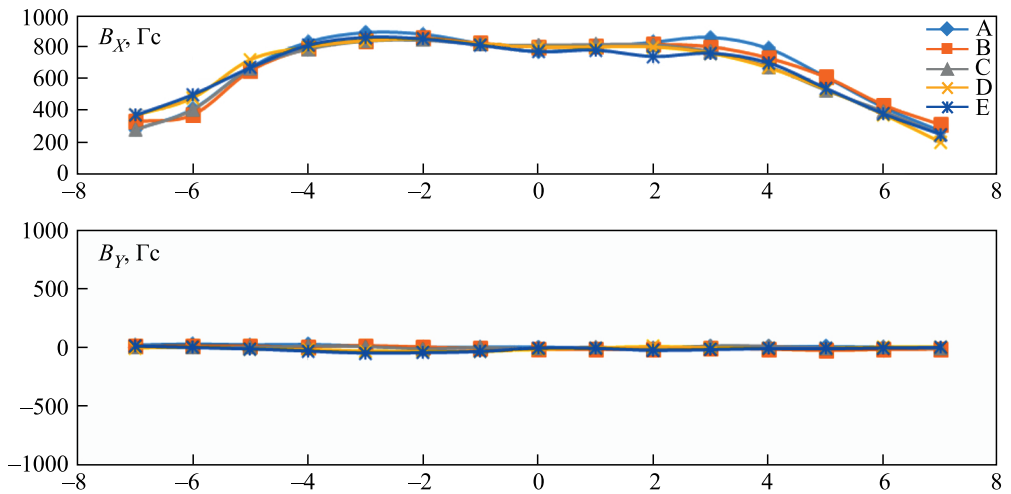


Рис. 12. Распределения компонент B_x и B_y магнитного поля вдоль продольных осей А-Е

2. Направления магнитных силовых линий отклонены от оси OX по 30° в противоположные стороны путем поворота магнитов:

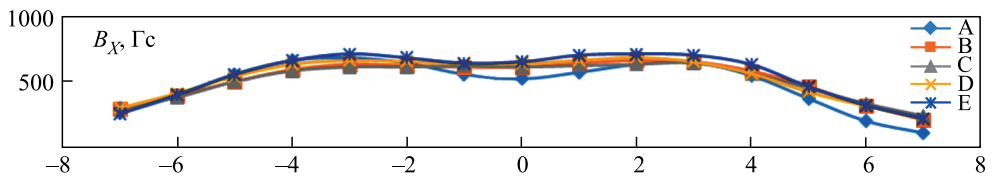


Рис. 13. Распределения B_x вдоль продольных осей

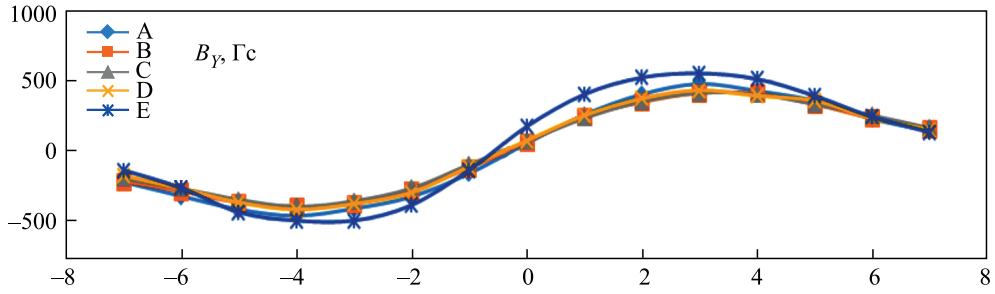


Рис. 14. Распределения B_Y вдоль продольных осей

3. Направления магнитных силовых линий отклонены от оси OX по 60° в противоположные стороны путем поворота магнитов:

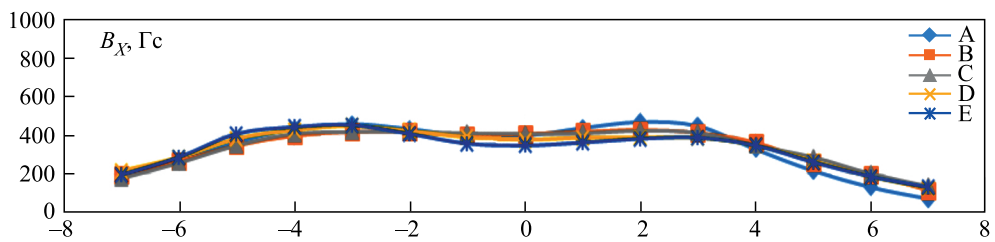


Рис. 15. Распределения B_X вдоль продольных осей

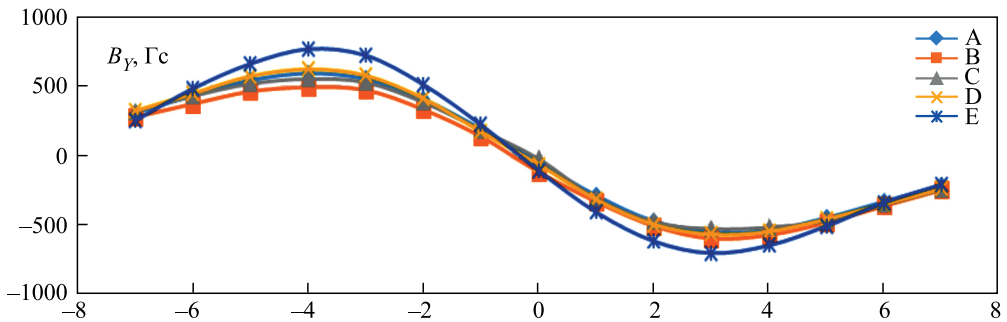


Рис. 16. Распределения B_Y вдоль продольных осей

4. Направления магнитных силовых линий отклонены от оси OX по 90° в противоположные стороны путем поворота магнитных контуров:

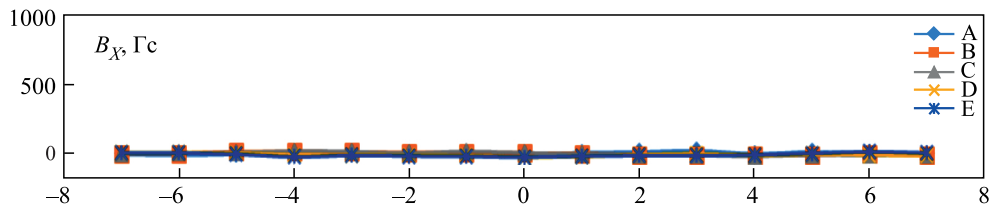


Рис. 17. Распределения B_X вдоль продольных осей

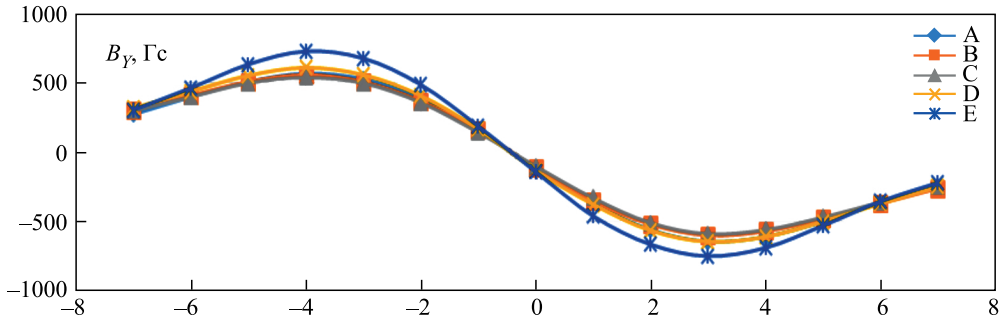


Рис. 18. Распределения B_y вдоль продольных осей

5. Результаты по оси C при разных углах:

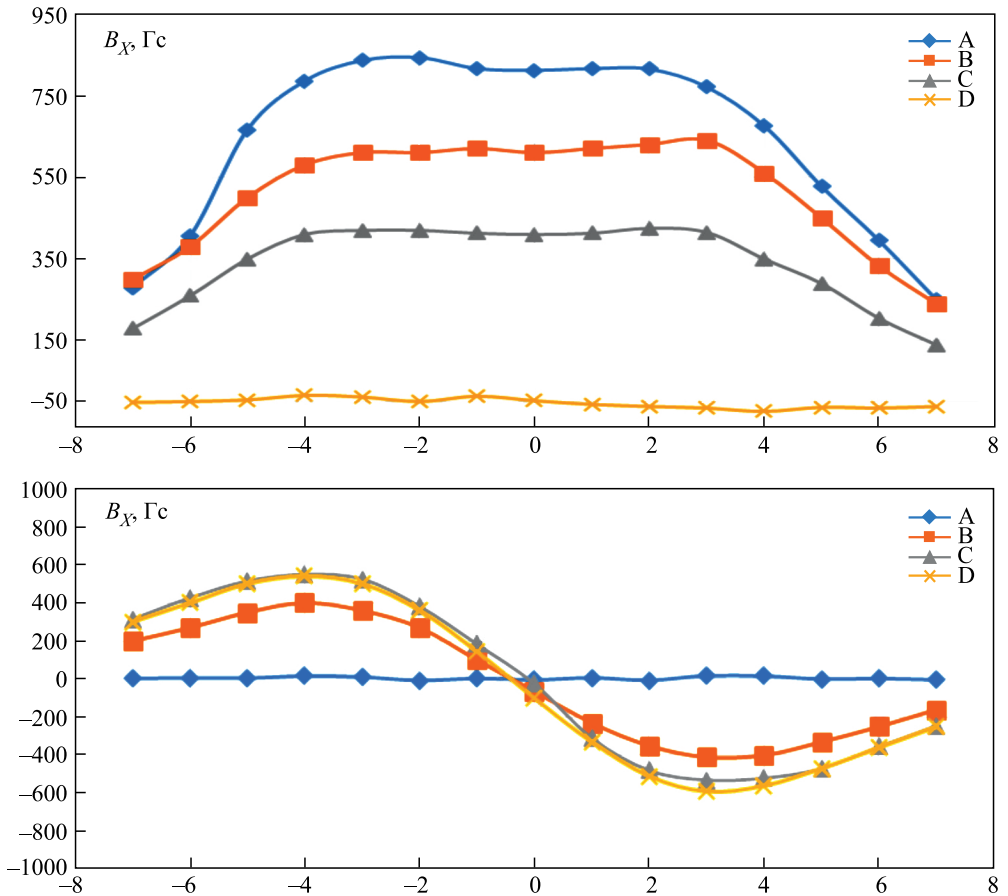


Рис. 19. Распределения компонент магнитного поля вдоль оси C при разных углах

5. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ НА МАКЕТЕ КОРРЕКТОРА

Результаты магнитных измерений позволяют сделать следующие выводы:

- уровень достижимых полей лежит в области 1 кГс;
- область однородности интеграла отклоняющего поля $> 0,5$ от полной апертуры;
- интеграл поля перпендикулярной составляющей пренебрежимо мал;
- интеграл отклоняющего поля меняется от нуля до максимального значения при относительном вращении модулей корректора вокруг оси.

Следует отметить, что приведенные результаты являются оценочными, поскольку на данном этапе не ставились задачи оптимизации конструкции и точности измерений. Предполагалось только продемонстрировать перспективность использования постоянных магнитов в системах отклонения пучков заряженных частиц для ряда практических применений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный подход к созданию систем отклонения заряженных пучков на основе постоянных магнитов с механической регулировкой интеграла воздействия представляется весьма перспективным. Такие системы будут обладать неоспоримыми преимуществами в области низких и средних энергий квазинепрерывных пучков, например, в выводных каналах циклотронов. Следует также отметить, что данный подход может быть распространен и на другие магнитные устройства: квадруполь, диполь и т. д., при разбиении их на относительно короткие элементы со взаимным вращением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Trubnikov G., Butenko A., Kekelidze V., Khodzhbagiyev H., Kostromin S., Matveev V., Meshkov I., Sidorin A., Sorin A.* The NICA Project at JINR // Proc. of the Seventh Intern. Part. Accel. Conf. (IPAC'16), Pohang Accel. Lab., Korea, 2016. P. 2061–2065.
2. POISSON Program. Los Alamos Acc. Group. LA-UR-87-115. 1987.

Получено 10 мая 2018 г.