

ДИПОЛЬНЫЙ МАГНИТ СИСТЕМЫ ИНЖЕКЦИИ РЕЦИРКУЛЯТОРА SALO

*И. С. Гук, А. Н. Довбня, С. Г. Кононенко, В. Н. Лященко, А. Ю. Мыцыков,
В. П. Ромасько, А. С. Тарасенко, В. А. Щербинин*

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина

Разработана конструкция дипольного магнита для системы инжекции рециркулятора SALO. Изготовленный прототип магнита представляет собой С-образную конструкцию с прямоугольными срезами. Сечение полюса — 100×100 мм, апертура — 25 мм. Измерено распределение поля в магните при значении индукции поля в зазоре магнита 0,05 и 0,2 Тл. Вычислены эффективная длина магнита и мультипольные компоненты магнитного поля.

Dipole magnet design was developed for the injection system recirculator SALO. Fabricated prototype magnet has a C-shaped structure with rectangular slices. Pole cross section — 100×100 mm, aperture — 25 mm. Field distribution in the magnet at the value of the field induction in the magnet gap 0.05 and 0.2 T was measured. We calculated the effective length of the magnet and the multipole components of the magnetic field.

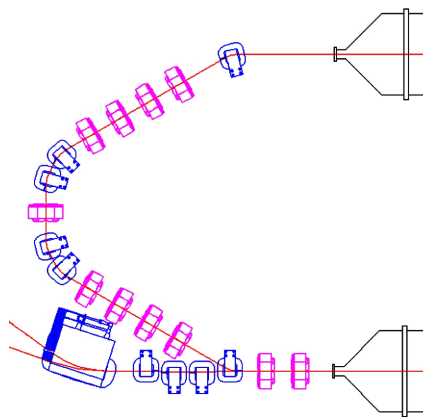
PACS: 29.20.-c

ВВЕДЕНИЕ

Поскольку стоимость магнитной системы рециркулятора SALO [1] составляет существенную долю в общей стоимости установки, унификация и упрощение технологии производства магнитов могут значительно снизить затраты на создание установки. В связи с этим уже на стадии расчета системы инжекции электронов в рециркулятор закладывалась возможность создания ее на основе одного магнита [2, 3] с достаточно простой геометрией. Возможность реализации этого варианта была продемонстрирована в эскизном проекте магнитной системы рециркулятора [3]. После проведения дополнительных исследований по оптимизации мы пришли к окончательному виду системы инжекции, представленному на рис. 1.

Рис. 1. Магнитооптическая система тракта инжекции

предназначенной для коррекции орбиты на участке ввода пучка. Углы поворота пучка в магнитах инжекционного тракта равны 30° , в магнитах змейки — менее 2° . Анализ показал, что поле во всех этих магнитах должно изменяться от 0,092 до 0,27 Тл.



1. ОПИСАНИЕ МАГНИТА

Расчеты параметров и выбор основных элементов магнита осуществлялись согласно методике, описанной в работе [3]. С помощью графического пакета AutoCAD [4] было проведено проектирование прототипа магнита. Общий вид разработанного магнита представлен на рис. 2. Для уменьшения тепловыделения обмотка магнита проектировалась слаботочной, с максимальным током, не превышающим 5 А. Катушки магнита, изготовленные по разработанной документации, показаны на рис. 3. Каркас катушек изготовлен из немагнитного материала.

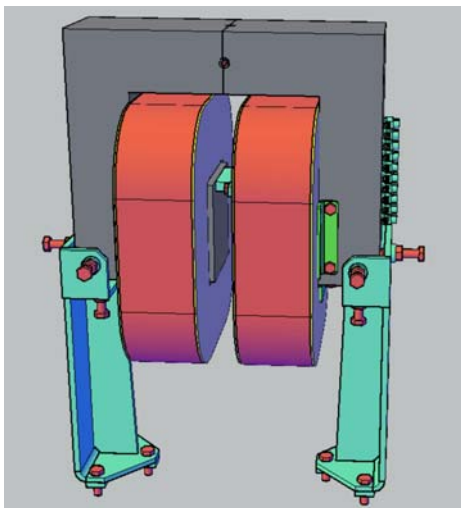


Рис. 2. Общий вид магнита



Рис. 3. Катушки магнита

Для намотки катушек использована медная проволока круглого сечения диаметром 1,57 мм. Эмалевая изоляция провода покрыта двумя слоями стекловолкнистой намотки с пропиткой термостойким лаком. Такая изоляция сохраняет свои свойства до температуры 180 °С. Каждая катушка содержит 1140 витков. Полное сопротивление обмотки одной катушки — 3,45 Ом.

Ярмо магнита изготовлено из железа АРМКО. Сечение полюсов квадратное, 100 × 100 мм. Расстояние между полюсами равно 25 мм. Ярмо состоит из двух одинаковых половинок, стянутых болтами из того же материала, что и ярмо. Для восстановления точного положения частей ярма используется система штифтов, запрессованных вблизи линии разреза. Окончательная шлифовка поверхностей магнита производилась после сборки ярма. Точность обработки поверхностей — 20 микрон.

Для разгрузки напряжений, возникающих в ярме, используется вставка из латуни, которая закреплена на полюсе магнита вблизи края.

Общий вид изготовленного магнита представлен на рис. 4.

Для исследования влияния конструкционных материалов на величину поля в магните была разработана и изготовлена вакуумная камера магнита (рис. 5), аналогичная камере для магнита змейки на основном кольце рециркулятора. Вакуумная камера магнита изготовлена из нержавеющей стали 12Х18Н10Т.

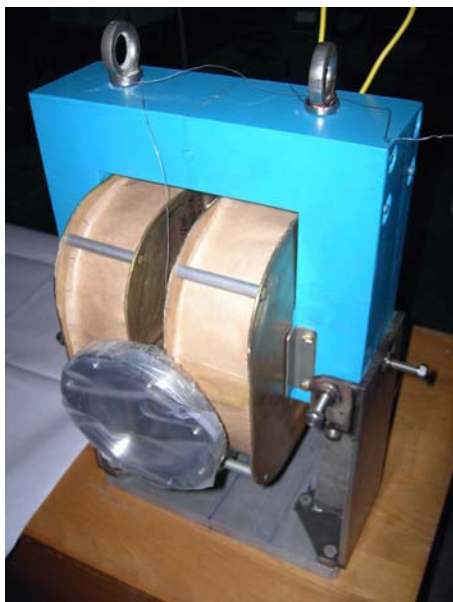


Рис. 4. Магнит в сборе



Рис. 5. Вакуумная камера магнита

2. ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТНОГО ПОЛЯ

С помощью матриц датчиков Холла были проведены измерения топографии магнитного поля в медианной плоскости магнита. Измерения проводились матрицей из семи датчиков, которая передвигалась вдоль оси движения пучка в магните. Расстояние между датчиками в матрице было близким к 6 мм, и их положение в матрице определялось с точностью ± 10 микрон. Расстояние между точками измерения вдоль движения матрицы изменялось от 3 до 5 мм в зависимости от величины градиента поля. Точность привязки положения датчиков относительно полюсов магнита составляла 100 микрон. Полученные измерения корректировались с учетом экспериментально измеренной температурной зависимости чувствительности каждого датчика. Измерения температурной зависимости датчика проводились в диапазоне температур от 14 до 35 °С. Абсолютная калибровка чувствительности каждого датчика проводилась с помощью датчика ЯМР. Относительная точность измерений была не хуже 0,1 %.

На рис. 6 и 7 представлены измеренные распределения поля для величин индукции поля 0,05 и 0,2 Тл, близких к выбранному рабочему диапазону значений поля в магните.

Наличие проставки между полюсами не позволило провести измерения поля в направлении ярма за пределами полюса.

На рис. 8 и 9 представлены измеренные распределения поля вдоль середины полюсов магнита для величины индукции в зазоре 0,05 и 0,2 Тл.

По данным измерения топологии была определена эффективная длина магнита по серединной линии магнита (рис. 8 и 9) для двух уровней поля. Для поля 0,05 Тл эффективная длина равна $(133,8 \pm 0,5)$ мм; для поля 0,2 Тл — $(133,4 \pm 0,5)$ мм.

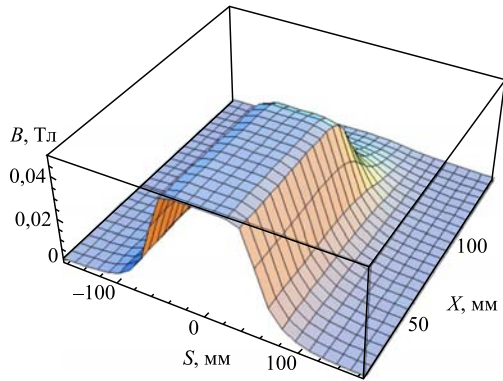


Рис. 6. Измеренное распределение для поля в зазоре магнита 0,05 Тл

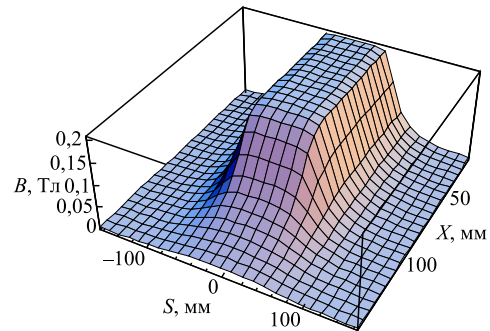


Рис. 7. Измеренное распределение для поля в зазоре магнита 0,2 Тл

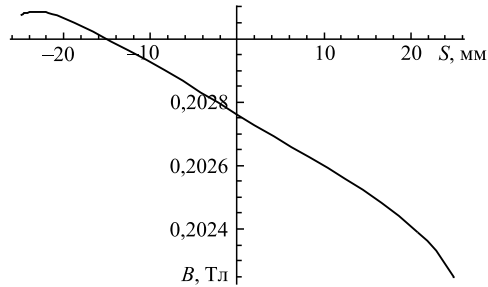
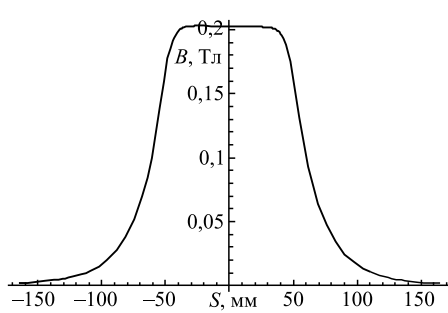


Рис. 8. Распределение поля с индукцией 0,2 Тл вдоль центра магнита в разных масштабах

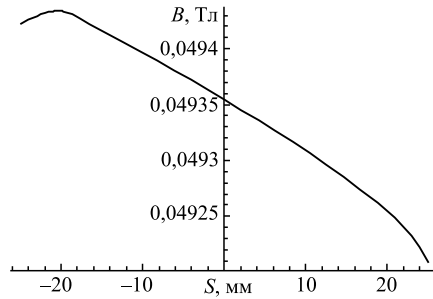
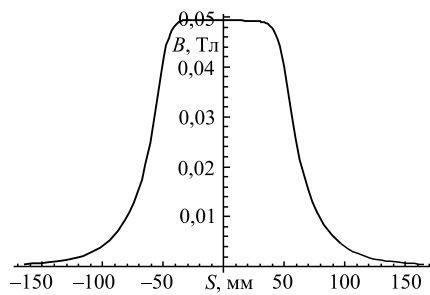


Рис. 9. Распределение поля с индукцией 0,05 Тл вдоль центра магнита в разных масштабах

Распределение поля по центру полюсов поперек движения электронов в магните представлено на рис. 10 и 11.

Кривая намагничивания при изменении величины тока в обмотке от 0 до 3 А приведена на рис. 12. Верхняя кривая 2 на рисунке соответствует возрастанию тока в обмотке, нижняя 1 — убыванию.

Для получения стабильных результатов при изменении поля в магните использовалась следующая процедура размагничивания: ток в обмотке медленно увеличивался

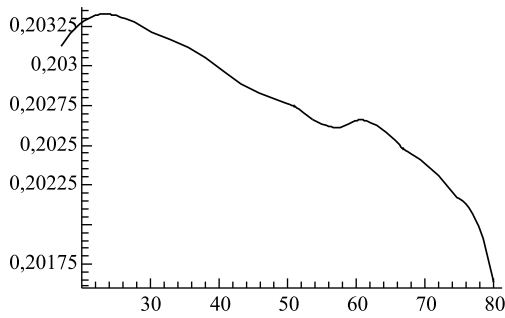


Рис. 10. Распределение магнитного поля перпендикулярно центральной линии магнита. Индукция поля — 0,05 Тл

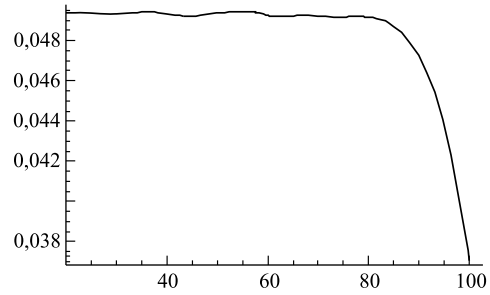


Рис. 11. Распределение магнитного поля перпендикулярно центральной линии магнита. Индукция поля — 0,2 Тл

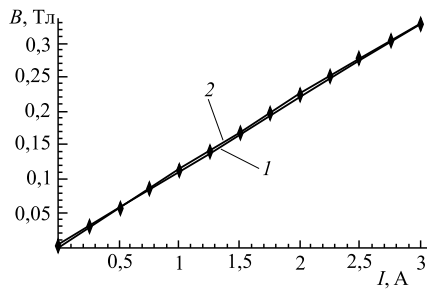


Рис. 12. Кривая намагничивания: 1 — ток убывает, 2 — ток возрастает

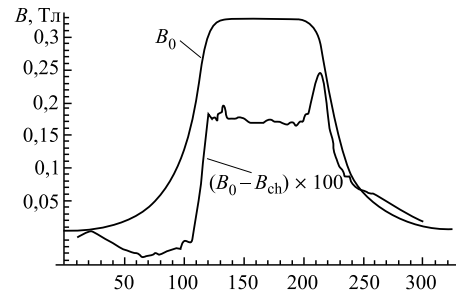


Рис. 13. Измерение распределений поля с вакуумной камерой

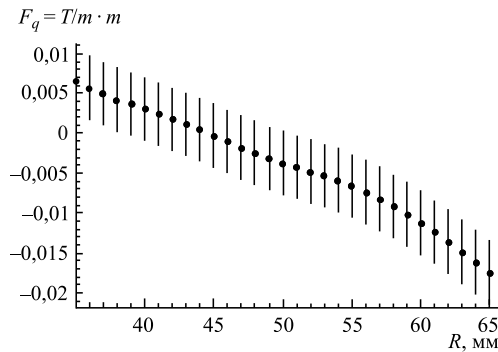


Рис. 14. Зависимость интеграла квадрупольной составляющей поля магнита вдоль траектории от поперечного положения орбиты в магните (50 соответствует центру магнита)

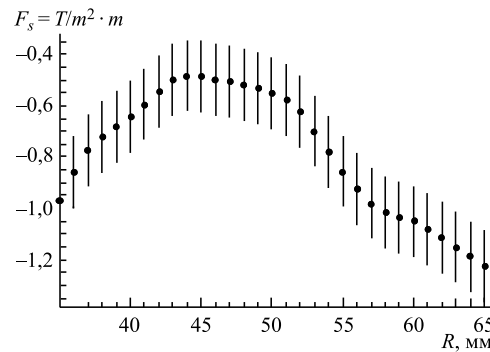


Рис. 15. Зависимость интеграла секступольной составляющей поля магнита вдоль траектории от поперечного положения орбиты в магните (50 соответствует центру магнита)

от 0 до 3 А, а затем с той же скоростью уменьшался до 0. Цикл намагничивания-размагничивания повторялся не менее 10 раз.

В процессе измерений было исследовано влияние вакуумной камеры на распределение поля. Измерения проводились с помощью перемещения двух датчиков Холла вдоль

одной и той же траектории (вдоль по пучку) в одном и том же поле для двух случаев. В первом случае измерялось распределение поля без вакуумной камеры (кривая B_0 , рис. 6). Во втором случае измерялось распределение поля B_{ch} с вакуумной камерой. Результаты измерений приведены на рис. 13.

Полученные карты поля позволяют оценить величину квадрупольной и секступольной составляющей поля магнита. Для поля 0,2 Тл при интегрировании вдоль оси магнита (по пучку) эти оценки приведены на рис. 14 и 15. Формы приведенных зависимостей полностью соответствуют топологии дипольного С-образного магнита.

ВЫВОДЫ

Разработанный и изготовленный магнит полностью отвечает требованиям работы в составе системы инъекции рециркулятора SALO. Диапазон изменения поля соответствует заданным значениям. Охлаждение обмотки за счет естественной циркуляции воздуха оказалось эффективным. В процессе эксплуатации магнита на стенде в рабочем режиме температура обмотки не превышала температуру окружающего воздуха более чем на 15 °С. Полученные в результате изготовления опытные данные позволят усовершенствовать технологию изготовления как ярма, так и катушек магнита.

Измеренные распределения поля будут использованы для моделирования движения частиц в магнитной структуре рециркулятора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dovbnja A. N. et al.* Recirculator SALO Project in NSC KIPT // Proc. of EPAC08, Genoa, Italy, 2008. P. 2710–2712.
2. *Dovbnja A. N. et al.* The Electron Beam Lines from SALO Recirculator to Physical Installation // J. of Kharkov Nat. Univ. 2007. No. 784, Iss. 4/36. P. 74–78.
3. *Dovbnja A. N. et al.* Draft Design of Recirculator SALO Magnetic System // Ibid. P. 3–14 (in Russian).
4. <http://www.autodesk.ru/adsk/servlet/pc/index?siteID=871736&id=14626749>