



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

98-102

P9-98-102

Н.А.Морозов

РАСЧЕТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
СЕКТОРНОГО ЦИКЛОТРОНА-ИНЖЕКТОРА ДЦ-1

1998

Для разработки технического проекта секторного циклотрона-инжектора (СЦИ) ДЦ-1 [1] были проведены расчеты его магнитного поля с целью:

- определения основных параметров магнитной системы циклотрона;
- получения таблиц магнитного поля для проведения расчетов динамики пучка;
- формулирования требований на другие системы циклотрона.

Основные параметры циклотрона приведены в табл.1.

Таблица 1. Базовые параметры СЦИ

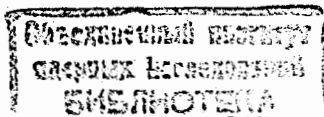
| | |
|--|-------------------|
| Тип ускоряемых частиц | Дейтроны |
| Максимальная расчетная интенсивность ускоренного пучка (мА) | 20 |
| Энергия инъекции/экстракции частиц (МэВ) | 0,3/15 |
| Тип магнитной системы | Секторные магниты |
| Среднее значение магнитного поля в области ускорения (Тл) | 0,51 |
| Периодичность структуры магнитной системы | 4 |
| Требуемые значения частот свободных бетатронных колебаний Q_z, Q_r | 1-1,3 |
| Зазор между полюсами магнитов (см) | 3 |
| Угловая протяженность секторов (град) | 30 |

Выбор основных параметров секторных магнитов

Результаты предварительного выбора параметров секторных магнитов СЦИ приведены в работе [1]. При анализе этих параметров обращает на себя внимание сравнительно высокая мощность питания, потребляемая магнитной системой (~200 кВт). Поэтому, помимо получения таблиц магнитного поля, главной целью расчетов было снижение этой мощности. В качестве исходной геометрии для расчета секторного магнита была взята геометрия из работы [1]. На начальной стадии расчетов в нее были внесены изменения:

- для размещения шиммирующих магнитное поле боковых накладок на полюса магнита и для возможности технологической реализации установки вакуумной камеры ускорителя обмотка возбуждения магнита была поднята на расстояние 5 см от средней плоскости зазора магнита;
- выделенное для обмотки возбуждения магнита пространство было увеличено до размера 5×25 см, что дает возможность разместить 80 витков проводника размером 10×10 мм (вместо 45 в работе [1]) и тем самым почти в два раза снизить плотность тока в обмотке.

Исходная геометрия магнита показана на рис.1 (В.1). На этом этапе расчетов в качестве расчетной геометрии использовалась аксиально-симметричная модель с геометрией, соответствующей радиальному сечению секторного магнита по его осевой линии. Расчеты проводились по программе POISCR [3]. В этом приближении в расчете моделировалось получение распределения магнитного поля вдоль осевой линии секторного магнита и значения уровня индукции магнитного поля в различных частях магнитопровода. Расчеты магнитного поля для конфигурации В.1 (распределение поля на оси приведено на рис.2) показали



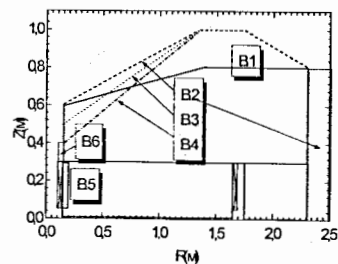


Рис.1.Изменения формы ярма секторного магнита при расчете

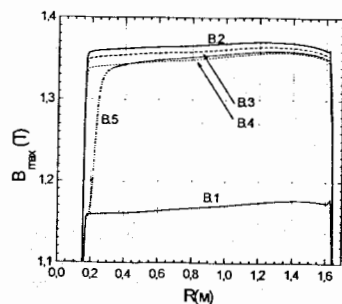


Рис.2.Поле вдоль оси магнита для различных вариантов геометрии

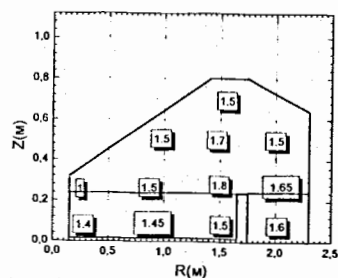


Рис.3.Индукция магнитного поля в ярме секторного магнита

высокий уровень индукции поля (до 1,8 - 2 Тл) в области горизонтального ярма ($R=1,7$ м) и вертикальной стойки ($R=1,75 - 2,3$ м). Это определялось тем, что отношение площади сечения ярма для этих областей к площади полюса в работе [1] было выбрано равным 0,7. Это приводит к существенному увеличению мощности питания, потребляемой основной обмоткой магнита, при незначительной экономии массы железа. Увеличение указанного выше отношения сечений до 1 (вариант В.2) приводит к снижению требуемого тока питания обмотки примерно на 40%, что дает почти двойную экономию потребляемой магнитной системой мощности.

Удаление части ферромагнитного материала ярма по направлению к центру магнита (варианты В.3 и 4) мало влияет на форму и уровень поля в зазоре магнита (рис.2) и дает экономию материала для ярма магнита. Вариант В.4 был выбран как окончательный для геометрии ярма секторного магнита.

С целью некоторого освобождения места в центральной области магнитной системы для размещения элементов системы инъекции пучка был рассчитан вариант геометрии (В.5), когда в полюсе сделана выборка и на это место помещена обмотка магнита. Расчеты показали появление недопустимо большого провала магнитного поля (рис.2) в области радиусов инъекции пучка.

Для увеличения поля в области инъекции было рассчитано изменение поля из-за ферромагнитной накладки в носовой части магнита (вариант В.6). Это изменение оказалось несущественным.

Распределение индукции поля внутри магнитопровода для окончательной его конфигурации при номинальном токе возбуждения магнита $I_{\text{н}}=52000$ А приведено на рис.3.

На рис.4 изображена геометрия секторного магнита. В табл.2 приведены параметры магнитопровода магнита.

Таблица 2. Параметры магнитопровода секторного магнита

| | |
|--|---------|
| Габаритные размеры (м) | 2,5x2x1 |
| Масса железа (т) | 20 |
| Азимутальная протяженность полюса (град) | 30 |
| Зазор между полюсами (см) | 3 |

С учетом того, что из-за разброса геометрии и характеристик материалов секторных магнитов необходимо иметь отдельную по всем магнитам коррекцию поля, основная обмотка магнитов, а следовательно и система питания может быть реализована в двух вариантах:

- основная обмотка каждого магнита питается от отдельного источника питания, для питания магнитной системы необходимо иметь 4 источника средней мощности;
- основная обмотка возбуждения дополняется небольшой корректирующей обмоткой, четыре основные обмотки питаются от одного мощного источника питания, каждая из четырех корректирующих обмоток питается источником малой мощности.

Выбор схемы питания должен быть осуществлен путем минимизации ее суммарной стоимости. Параметры обмоток и источников питания для обоих вариантов приведены в табл.3.

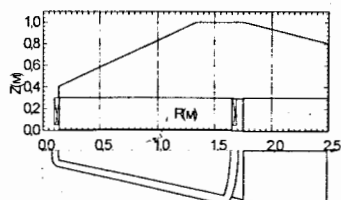


Рис.4.Геометрия секторного магнита

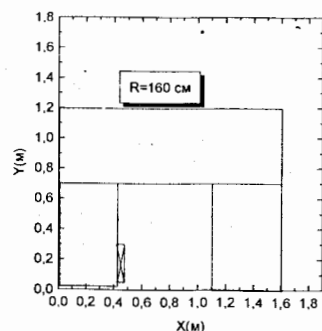


Рис.5.Расчетная модель для азимутального сечения магнита R=160 см

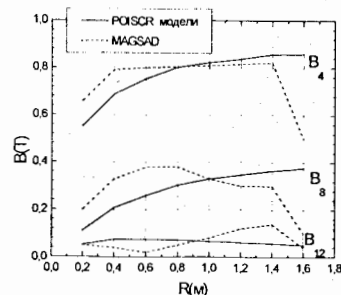


Рис.6.Гармоники магнитного поля секторного магнита

Таблица 3. Параметры обмоток секторного магнита и источников питания

| | Вариант 1, основная обмотка | Вариант 2, основная обмотка | Вариант 2, корректир. обмотка |
|---|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Поперечное сечение обмотки (мм) | 50×250 | 50×230 | 50×20 |
| Размеры проводника (мм) | 10×10, Ø6 | 10×10, Ø6 | 8,5×8,5, Ø5,3 |
| Число витков в одной обмотке | 80 | 76 | 10 |
| Номинальный ток (А) | 325 | 345 | - |
| Максимальный ток (А) | 400 | 450 | 100 |
| Номинальное/максимальное напряжение (В) (на один магнит) | 53/66 | 54/70 | -/3 |
| Масса обмотки (кг) (на один магнит) | 425 | 400 | 40 |

Параметры источников питания

| | | | |
|--|---------|---------|-------|
| Номинальный/максимальный ток (А) | 325/400 | 345/450 | -/100 |
| Номинальное/максимальное напряжение (В) | 53/66 | 235/280 | -/3 |
| Номинальная/максимальная мощность (кВт) | 17/26 | 74/126 | -/0,3 |
| Количество источников | 4 | 1 | 4 |

Расчеты вариации магнитного поля

Для расчета вариации магнитного поля были использованы модели POISCR, геометрии которых представляют собой сечение по азимуту секторного магнита для выбранного ряда радиусов. Для замыкания магнитного потока в модели вводилось фиктивное ярмо. Расчеты проводились для радиусов R=20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160 см. Вид такой модели для R=160 см приведен на рис.5.

Результаты расчетов гармоник вариации магнитного поля при помощи таких моделей и расчетов по программе MAGSAD (из работы [1]) приведены на рис.6. Видно, что несовпадение результатов расчетов по двум методам для основной четвертой гармоники вариации магнитного поля составляет более 10%. В области инъекции пучка это отличие достигает максимального значения. На рис.7 приведено распределение поля вдоль осевой линии магнита, полученное при помощи моделей азимутального сечения и аксиально-симметричной модели. На рис.8 приведены азимутальные распределения поля для расчетных радиусов.

Расчеты с использованием экспериментальных данных

В НЗОНУ ЛЯП было проведено моделирование [2] секторного магнита для мощного нейтронного генератора (МГТН) в масштабе 1:7. Результаты измерений магнитного поля на этой модели с коррекцией углового размера секторного магнита с 25° до 30° были использованы для получения данных по магнитному полю СЦИ. После приведения размеров этой модели к размерам магнита СЦИ радиальная протяженность приведенного магнита составляет R=28 - 143 см

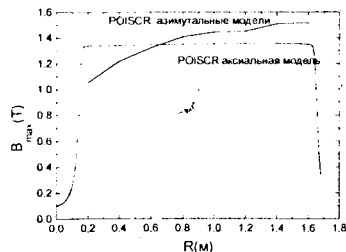


Рис.7. Магнитное поле вдоль оси секторного магнита

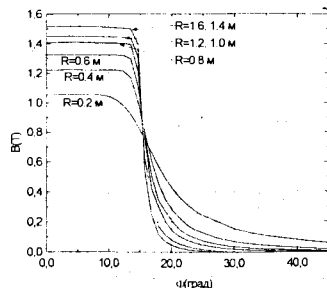


Рис.8. Азимутальные распределения магнитного поля

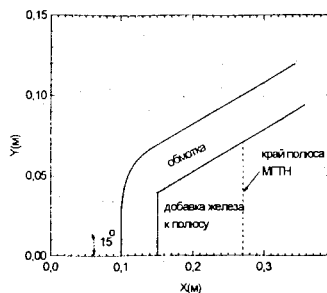


Рис.9. Форма добавки железа и обмотки для расчета в центральной области секторного магнита

вместо $R=15 - 165$ см для магнита СЦИ. Для получения поля магнита СЦИ в необходимом диапазоне радиусов к экспериментальным данным МГТН были добавлены расчетные поля для центральной добавки обмотки и железа к полюсу магнита МГТН (рис.9). Расчеты проводились по программе MAFCOD. В аксиальном направлении область добавляемого железа была разбита на четыре части с аксиальными размерами $Z=1,5 - 10, 10 - 20, 20 - 30, 30 - 40$ см. Каждая часть имела свое постоянное значение намагниченности в аксиальном направлении. Значение намагниченности определялось в расчетах при помощи аксиально-симметричной модели POISCR и составляло:

для первой части ферромагнетика - 1,38 Тл,
 для второй - 1,30 Тл,
 для третьей - 1,12 Тл,
 для четвертой - 0,70 Тл.

Результаты расчета магнитного поля для добавленных в центральной области элементов приведены на рис.10. Для радиусов $R \geq 140$ см поле для магнита СЦИ получено из поля МГТН путем его радиального сдвига на 20 см. Результаты суммирования расчетного поля в центре с экспериментальным и адаптации экспериментального поля в зоне конечных радиусов приведены для гармоник вариации на рис.11. Видно, что методика использования POISCR расчетных моделей дает более близкие к экспериментальным данным результаты, чем MAGSAD. Результаты по среднему магнитному полю приведены на рис.12.

Формирование среднего поля в центральной зоне циклотрона

Расчет среднего магнитного поля (рис.12) показал, что путем тонкой коррекции профиля полюса (аксиальной или азимутальной) требуемое изохронное поле может быть сформировано для данной конфигурации магнита начиная с радиуса $R=22$ см. Так как для энергии инжекции пучка 0,3 МэВ среднее значение радиуса равновесной орбиты равно примерно 20 см, то с учетом амплитуды вынужденных колебаний около 1,5 см формирование среднего изохронного поля должно осуществляться начиная с радиуса $R=18$ см.

Для формирования требуемого среднего поля в диапазоне радиусов $R=18 - 28$ см расчетным способом были рассмотрены несколько возможностей:

1. Использование токовых обмоток. Эксперименты на модели магнита МГТН показали, что для формирования среднего магнитного поля необходимо иметь воздушный зазор в области полюса с аксиальным размером $\Delta Z=7 - 10$ мм, на расстоянии 10 см от средней плоскости магнита. Этот зазор может быть использован для размещения корректирующих токовых обмоток. Были рассчитаны магнитные поля для двух секторных обмоток ($I_{\text{кв}}=4200$ А), расположенных в этом зазоре. Результаты расчета приведены на рис.13. Видно, что необходимый для коррекции среднего поля уровень 80 мТл не может быть получен при помощи этих обмоток. Было также рассчитано поле для второго типа обмоток, намотанных вокруг центральной части ядра секторного магнита. Обмотки также проходят через воздушный зазор в полюсе. Результаты расчета полей таких обмоток при их различном радиальном положении в воздушном зазоре полюса приведены на рис.14. Видно, что необходимое значение магнитного поля при помощи обмоток второго типа также не может быть получено.

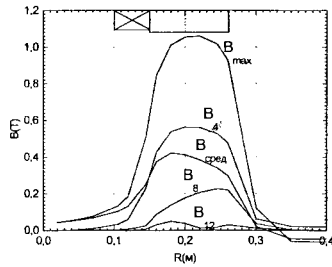


Рис.10.Магнитное поле для центральной добавки к структуре секторного магнита

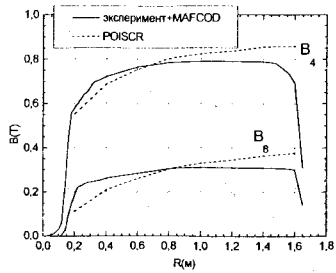


Рис.11. Магнитное поле после коррекции экспериментального поля и расчетов по POISCR моделям

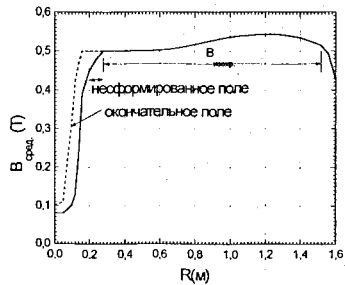


Рис.12.Среднее магнитное поля СЦИ

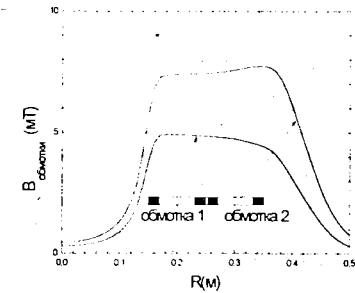


Рис.13.Расположение и поля токовых обмоток, установленных в воздушном корректирующем зазоре полюса магнита

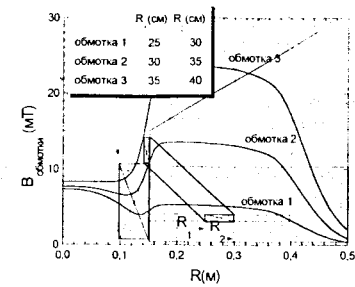


Рис.14.Положение и поля корректирующих обмоток, намотанных вокруг носовой части секторного магнита

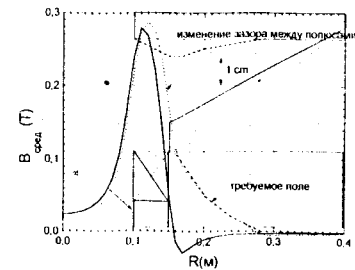


Рис.15.Коррекция поля магнита, изменением зазора между полюсами

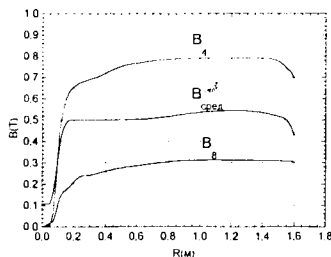


Рис.16. Окончательные данные по магнитному полю циклотрона

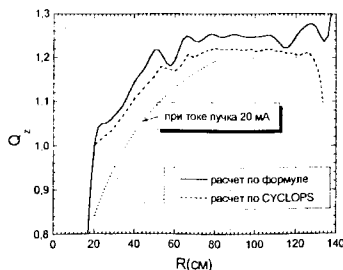


Рис.17. Частота аксиальных свободных бетатронных колебаний

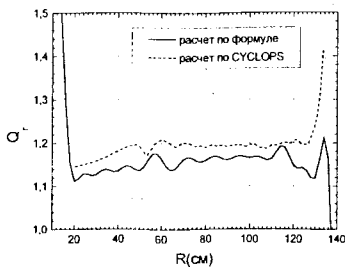


Рис.18. Частота радиальных свободных бетатронных колебаний

2. Коррекция формы полюса. Для коррекции спада магнитного поля в области инжекции пучка было добавлено железо на полюс под обмоткой возбуждения магнита $R=10 - 15$ см, $\Delta Z=1,5 - 5$ см. Дальнейшая коррекция поля проводилась путем уменьшения зазора между полюсами магнита. Путем изменения междуполюсного зазора до 2 см можно получить необходимую коррекцию среднего поля. Результаты расчета и форма полюса в центре приведены на рис.15.

Таблицы магнитного поля

Окончательные зависимости от радиуса среднего и гармоник магнитного поля приведены на рис.16.

Результаты расчета частот аксиальных свободных бетатронных колебаний по приближенным формулам и по программе интегрирования равновесных орбит CYCLOPS приведены на рис.17. Там же показана зависимость частоты Q_z при интенсивности ускоренного пучка 20 мА. Видно, что на радиусе инжекции значение Q_z будет не ниже значения 0,84. Результаты расчета частот радиальных колебаний приведены на рис.18.

Выводы

Путем проведения расчетов выбрана оптимальная форма секторного магнита циклотрона, сформулированы требования к системе питания обмоток магнитов.

На основе проведенных расчетных работ и использования экспериментальных данных получены таблицы магнитного поля для магнитной системы циклотрона, состоящей из четырех секторных магнитов с угловой протяженностью полюса 30° . Точность этих таблиц составляет величину не хуже чем 5%.

Задача тонкого шиммирования поля может быть решена при измерении поля на головном образце полномасштабного секторного магнита. Возможна проверка результатов расчета магнитного поля на модели магнита в масштабе 1:3.

Литература

1. Аленицкий Ю.Г. и др. Секторный циклотрон-инжектор ДЦ-1. Труды второго Международного совещания по циклотронам и их применению, г.Бехине, СССР, 1989 г. Дубна, Д9-89-708, стр.96.
2. Заплатин Н.Л., Морозов Н.А. Моделирование секторного электромагнита мощного нейтронного генератора (М 1:7), Р9-12587, Дубна, 1979.
3. Holsinger R.F., Iselin Ch. The CERN POISSON program package user guide. CERN, 1983.

Рукопись поступила в издательский отдел

21 апреля 1998 года.