

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

58/2-82

У/1-82

P9-81-664

Ю.Г.Аленицкий, Н.Л.Заплатин, С.А.Ивашкевич,
Н.А.Морозов, Л.М.Онищенко, С.И.Чеснова,
П.Т.Шишлянников

ФОРМИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
ФАЗОТРОНА ОИЯИ

1981

Сильноточный фазотрон ОИЯИ /установка "Ф"/, создаваемый на базе синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, предназначен для ускорения пучка протонов до энергии 680 МэВ с интенсивностью /10-50/ мкА. Выбор параметров и моделирование магнитной системы ускорителя проводились в масштабе 1:5,22 и описаны в работах /1-3/. Вопросы точности изготовления элементов магнитной системы и возможности шиммирования магнитного поля рассматривались в /4/.

В данном сообщении приведены данные по точности сборки всей магнитной системы установки "Ф" и по шиммированию среднего магнитного поля и его низших гармоник.

МАГНИТНАЯ СИСТЕМА УСТАНОВКИ "Ф"

Магнитная система сильноточного фазотрона состоит из четырех пар спиральных шимм, создающих пространственную вариацию магнитного поля, и профилированных кольцевых шимм, задающих величину растущего вдоль радиуса среднего поля ускорителя. Магнитное поле для средней плоскости фазотрона с пространственной вариацией в цилиндрической системе координат записывается в виде

$$B_z(r, \phi) = \bar{B}_z(r) + \sum_{k=1}^{\infty} B_{zk}(r) \cos\{k[\phi - \phi_{zk}(r)]\},$$

где $\bar{B}_z(r)$ - среднее магнитное поле; $B_{zk}(r)$, $\phi_{zk}(r)$ - амплитуда и фаза его k -й гармоники.

Рост $B_z(r)$ выбран максимальным для заданных зазоров магнитной системы, чтобы получить максимально возможную интенсивность пучка ускоренных протонов. Характер зависимости среднего магнитного поля и амплитуды его вариации выбирался из условия отсутствия фазовых потерь и обеспечения устойчивости движения пучка во всем цикле ускорения. Требуемая зависимость $B_z(r)$ от радиуса записывается в виде

$$\bar{B}_z(r) = B_0 \exp(0,359 \xi^2 + 0,83 \xi^6 - 2,351 \xi^8 + 1,5 \xi^9 - 0,025 \xi^{10}),$$

где $B_0 = 11902$ Гс, $\xi = r/r_k$, $r_k = 270$ см. Эта зависимость выбрана также с учетом требований, связанных с выводом пучка из камеры ускорителя.

Магнитное поле ускорителя создается в зазоре электромагнита Е1-Б с Ш-образным магнитопроводом, диаметр полюсов которо-

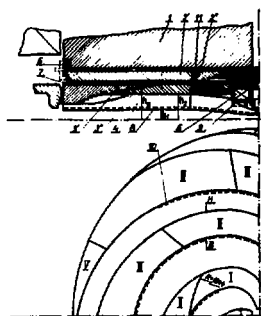


Рис.1. Схема магнитной системы установки "Ф". 1 - полюс, 2 - внешний диск, 3 - внутренний диск, 4 - спиральные шиммы, 5 - концентрические обмотки, 6 - клинья и зацепы крепежные, 7 - секторные шиммы, 8 - корректирующие прутки, 9 - обмотки коррекции 1-й гармоники, 10 - боковые накладки, 11 - расклинивающее устройство.

Рис.2. Нижний полюсный наконечник.



го равен 600 см. В зазоре электромагнита помещается ускорительная камера, схема которой показана на рис.1. На рис.2 приведена фотография нижнего полюсного наконечника. Полюсные наконечники состоят из двух дисков /2,3/ - рис.1. Для компенсации атмосферной нагрузки их соединение выполнено в виде напряженной конструкции. Для создания растущего с радиусом среднего магнитного поля диск /2/ в центре имеет выборку, а диск /3/ состоит из ферромагнитного кольца /3'/ и диска /3''/ из немагнитной стали. Вариация магнитного поля создается четырьмя па-

рами спиральных шимм /4/, сдвинутых друг относительно друга на 90° . Ускорительная камера крепится в зазоре электромагнита по периметру полюса с помощью зацепов и клиньев /6/. Фиксация камеры также осуществляется на радиусе $r=100$ см при помощи расклинивающего устройства /11/.

Искажения магнитного поля ускорителя могут быть вызваны такими причинами, как различие магнитных свойств материалов, неточность изготовления и монтажа ферромагнитных элементов электромагнита и ускорительной камеры, размещение вблизи ускорителя стальных конструкций большой массы. Анализ ожидаемых возмущений магнитного поля /4/ показал, что возможны отклонения от требуемого среднего магнитного поля до 300 Гс, а первая гармоника может составлять $B_1 \approx 30$ Гс.

Для шиммирования возмущений магнитного поля в системе предусмотрены следующие элементы:

1. Секторные шиммы тонкой коррекции /8/, которые представляют собой ферромагнитные прутки $\phi 10$ мм, расположенные в долях между шиммами в диапазоне радиусов /7,5-297,5/ см с шагом по радиусу 5 см, по три штуки по высоте.

2. Боковые накладки на спиральных шиммах в диапазоне радиусов /50-230/ см толщиной от 2 до 18 мм, высотой 150 мм.

3. Секторные шиммы с азимутальной протяженностью 12° /по 24 шт. сверху и снизу и толщиной от 5 до 25 мм/, размещенные между дисками /2/ и /3/.

4. Токовые концентрические /5/ и гармонические /9/ обмотки, установленные в центральной области фазотрона.

ТОЧНОСТЬ СБОРКИ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

В процессе реконструкции были заменены обмотки возбуждения электромагнита Е-1Б и полюсные диски. Величина зазора между полюсами электромагнита показана в табл.1. Несоосность полюсов составляет 5 мм. Средняя плоскость магнита имеет негоризонтальность 4 мм на диаметре 600 см.

Таблица 1

r /см/	20	250	270
δ /мм/	1546,8 \pm 0,1	1547,5 \pm 0,5	1550,0 \pm 1

Результаты измерений магнитного поля в плоском зазоре электромагнита при токе $I_0=3700$ А показаны на рис.3а,б. Значение среднего магнитного поля соответствует расчетному. Из сравнения кривых 1 и 2 рис.3б видно, что неоднородность магнитного

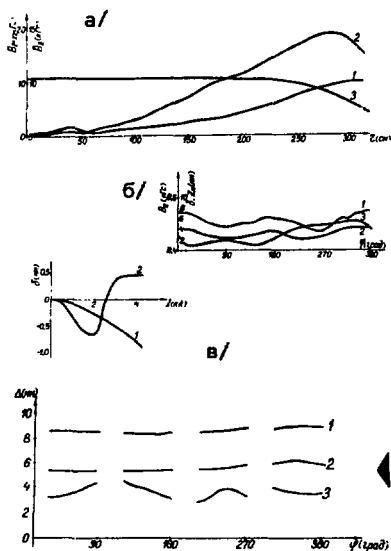


Рис. 3. а/ Характеристики магнитного поля магнита Е1-В. 1, 2 - амплитуды первой и второй гармоник; 3 - среднее поле. б/ Азимутальные характеристики магнитного поля для радиуса $r = 270$ см. 1 - распределение магнитного поля; 2 - отклонение зазора между полюсами; 3 - отклонение медианной поверхности магнитного поля от средней плоскости зазора магнита. в/ Изменение зазора между полюсами в зависимости от тока возбуждения магнита. 1 - $r = 110$ см; 2 - $r = 270$ см.

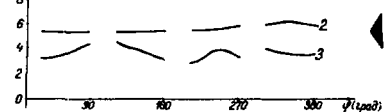
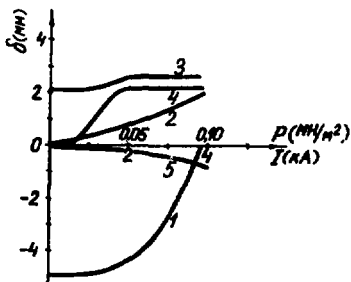


Рис. 4. Изменение зазора между спиральными шиммами. 1 - $r = 110$ см; 2 - $r = 180$ см; 3 - $r = 270$ см.

Рис. 5. Изменение зазоров между спиральными шиммами магнитной системы установки "Ф": 1 - при откачке камеры; 2 - при напуске атмосферы; 3 - при подаче тока возбуждения электромагнита после расклинивания при вакууме в камере; 4 - то же, что и 3, но при расклинивании без вакуума; 5 - то же, что и 3, $r = 270$ см; 1-4 для $r = 110$ см.



поля определяется межполюсным зазором электромагнита. Исходя из величин возмущений магнитного поля можно считать точность сборки электромагнита удовлетворительной. На рис. 3 в показаны изменения зазора в зависимости от тока возбуждения. На конечных радиусах изменение зазора вызывается прогибом балок магнита, а в центральной области - прогибом балок и устранением неплотностей в магнитопроводе.

Отклонения зазора между спиральными шиммами от величины 310 мм в ускорительной камере /в собранном состоянии/ на раз-

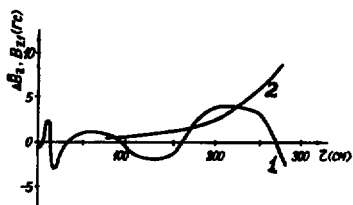


Рис.6. 1 - влияние изменения зазора на 5 мм между спиральными шиммами в центре ускорительной камеры на среднее магнитное поле; 2 - первая гармоника магнитного поля, возникающая из-за перекоса камеры относительно полюсов магнита на 4 мм.

личных радиусах показаны на рис.4. Видно, что на конечном радиусе /кривая 3/ неоднородность величины зазора между спиральями составляет 0,5 мм.

На рис.5 /кривая 1/ показано изменение зазора между спиральными шиммами на радиусе $r=110$ см в зависимости от давления в камере ускорителя. После расклинивания камеры и напуска атмосферы зазор увеличивается на 2 мм /кривая 2/. При возбуждении электромагнита увеличение зазора происходит по-разному в зависимости от того, откачана камера или нет перед расклиниванием /кривые 3 и 4 соответственно/. Окончательные значения зазоров в центре отличаются при этом на 0,4 мм /кривая 3/. На рис.6 /кривая 1/ показано изменение среднего магнитного поля при изменении зазора на 5 мм, откуда можно сделать вывод, что при формировании магнитного поля с точностью до 5 Гс можно не использовать расклинивание камеры под вакуумом, а изменение среднего магнитного поля после расклинивания ускорительной камеры под вакуумом и напуска атмосферы /кривая 3, рис.5/ не превышает 1 Гс. Изменение зазора между спиральными шиммами на конечном радиусе $r=270$ см /рис.5, кривая 5/ при возбуждении электромагнита не зависит от способа расклинивания камеры.

Так как полюса магнита Е-1Б имеют негоризонтальность 4 мм, при горизонтальной установке ускорительной камеры в магнитном поле установки "Ф" появилась дополнительная первая гармоника. Ее распределение приведено на рис.6 /кривая 2/. Радиальная установка камеры относительно полюсов выполняется с точностью 1 мм. Влияние смещения камеры относительно полюсов на первую гармонику магнитного поля для радиуса $r=270$ см составляет 3 Гс/мм.

ФОРМИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ УСКОРИТЕЛЯ

В результате измерений магнитного поля установки "Ф" после сборки магнитной системы были получены следующие данные:

1. Отклонение среднего магнитного поля от требуемого составляет до 300 Гс /рис.7, кривая 1/.

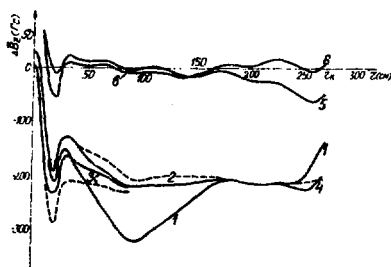


Рис.7. Отклонение среднего магнитного поля от требуемого; 1 - первоначальные измерения, 2 - после установки кольцевой шиммы, 3 - после проточки внешнего диска, 4 - после изготовления отверстий в спиральных шиммах, 5 - при токе возбуждения электромагнита 3750 А, 6 - после установки кольцевых шимм и корректирующих прутков. — — — — — эксперимент, - - - - - расчет.

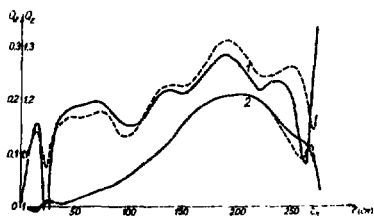


Рис.9. Частоты свободных бетатронных колебаний. 1 - Q_z , 2 - Q_r . — — — — — первоначальная конфигурация магнитной системы; - - - - - конфигурация магнитной системы после установки шиммирующих элементов.

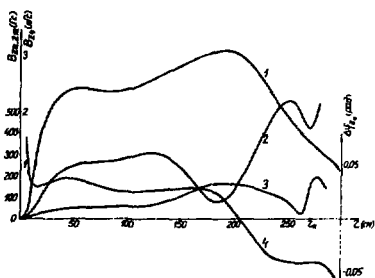


Рис.8. Характеристики магнитного поля. 1,2,3 - амплитуды четвертой, восьмой и двенадцатой гармоник; 4 - отклонение фазы четвертой гармоники от середины спиральной шиммы.

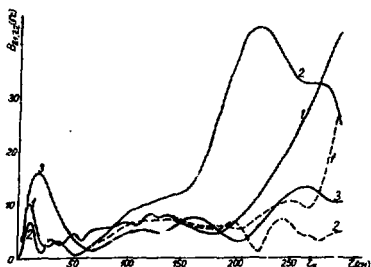


Рис.10. Амплитуды низших гармоник магнитного поля; 1 - первая гармоника, 2 - вторая гармоника, 3 - третья гармоника. — — — — — начальное распределение, - - - - - распределение после шиммирования.

2. Амплитуда и фаза четвертой гармоники, а также амплитуды восьмой и двенадцатой гармоник таковы, что обеспечивают фоку-

сировку частиц во всем диапазоне рабочих радиусов /рис.8, кривые 1-4; рис.9, кривые 1,2/.

3. Амплитуды первой и второй гармоник превышают допустимые в 2-3 раза /рис.10, кривые 1,2/.

Для предварительного шиммирования низших гармоник магнитного поля установки "ф" были использованы секторные шиммы /7/ /рис.1/. Их толщина, радиальное и азимутальное положения приведены в табл.2 /отсчет фазы гармоник и азимута расположений секторных шимм производится по часовой стрелке от оси камеры, направленной перпендикулярно кромке дуанта в сторону системы разводки пучков/.

Таблица 2

Параметры секторных шимм для шиммирования низших гармоник магнитного поля

Номер гармоники	1		2		
Δr /см/	250-300	200-250	280-300		
$\Delta \phi$ /град/	225-315	90-135	270-315	105-135	285-315
Δh /см/	0,5	1,0	0,5		

Результаты шиммирования представлены на рис.10 и 11. Видно, что предварительное шиммирование позволило снизить величины первой и второй гармоник до уровня 10 Гс. При корректировке гармоник для магнитного поля секторных шимм использовались результаты расчетов по методу сеток, приведенные в работе /5/. При этом азимутальное распределение магнитного поля описывалось ступенчатой функцией. На рис.10 и 11 /кривые 3/ представлены также данные, характеризующие третью гармонику магнитного поля. Ее величина не превышает 10-15 Гс. Характер распределения амплитуды третьей гармоники в центральной области соответствует несовпадению центра измерений и центра магнитной системы на 0,5 мм.

Таким образом, эти результаты показывают, что только в зоне вывода величина амплитуды первой гармоники превышает допуск 5 Гс. Устранение такого возмущения магнитного поля необходимо проводить при установке системы вывода и других ферромагнитных элементов, находящихся вблизи камеры ускорителя.

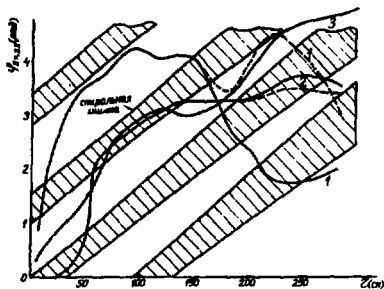


Рис.11. Фазы низших гармоник магнитного поля /обозначения рис.10/.

Для коррекции среднего магнитного поля были осуществлены следующие операции:

1. Установлена кольцевая шимма между внутренними и внешними дисками камеры толщиной 15 мм, $\Delta r = /75-125/$ см. Магнитное поле после установки кольцевой шиммы приведено на рис.7 /кривая 2/. Вклад этой кольцевой шиммы рассчитывался по методу секток^{16/}. Расчетное поле также приведено на рис.7.

2. Выполнена проточка внешнего диска на толщину 2,9 см, $\Delta r = /10-36,5/$ см. Магнитное поле, расчетное и экспериментальное, представлено на рис.7 /кривая 3/. При расчете влияния этой проточки на магнитное поле использовался метод равномерного намагничивания. Значение индукции внутри элемента было взято из расчета по методу сеток.

3. В спиральных шиммах было сделано по три отверстия $\phi 100$ мм на радиусе $r = 270$ см, что привело к изменению магнитного поля /рис.7, кривая 4/.

На рис.7 /кривая 5/ показано отклонение сформированного среднего магнитного поля от требуемого после указанных выше изменений в геометрии системы и увеличения рабочего тока возбуждения магнита до 3750 А. При дальнейшей коррекции среднего магнитного поля были введены кольцевые шиммы, набранные из секторных шимм / $\Delta r = /200-250/$ см, $\Delta h = 1,5$ мм; $\Delta r = /250-300/$ см, $\Delta h = 5$ мм/, и два корректирующих прутка / $r = 17,5$ см, $\phi 10$ мм/. Отклонение магнитного поля после установки этих элементов показано на рис.7 /кривая 6/. Видно, что за исключением центральной области / $r \leq 20$ см/ оно составляет ± 15 Гс. Это отклонение легко может быть скомпенсировано корректирующими прутками. Центральная область будет отшиммирована путем доработки центральной втулки.

На рис.9 приведены распределения частот свободных бетатронных колебаний Q_r, Q_z для первоначальной конфигурации магнитной системы и после введения корректирующих элементов. Расчет частот велся по формулам^{16/}. Частоты Q_r, Q_z находятся в пределах допуска во всей области рабочих радиусов за исключением центральной области и зоны радиуса $r_k = 270$ см.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы по сборке магнитной системы установки "Ф" и по шиммированию ее магнитного поля обеспечены требуемые его характеристики во всей области рабочих радиусов за исключением центральной области и зоны радиусов вывода пучка.

Авторы благодарят А.Н.Кокарева за проведение магнитных измерений, П.П.Гавриша, Е.Д.Городничева, Г.Н.Сайфулину за помощь в эксплуатации аппаратуры регистрации информации, В.Н.Аносова за обеспечение бесперебойной работы системы обработки информации на ЭВМ ЕС-1010.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дьяков Н.И., Ворожцов С.Б., Заплатин Н.Л. ОИЯИ, 9-4517, Дубна, 1969.
2. Аленицкий Ю.Г. и др. ОИЯИ, Р9-5246, Дубна, 1970.
3. Аленицкий Ю.Г., Ворожцов С.Б., Заплатин Н.Л. ОИЯИ, Р9-5590, Дубна, 1971.
4. Аленицкий Ю.Г., Заплатин Н.Л., Морозов Н.А. ОИЯИ, 9-80-792, Дубна, 1980.
5. Заплатин Н.Л., Морозов Н.А. ОИЯИ. Р9-12587, Дубна, 1979.
6. Аленицкий Ю.Г. и др. ОИЯИ, Р9-10091, Дубна, 1976.