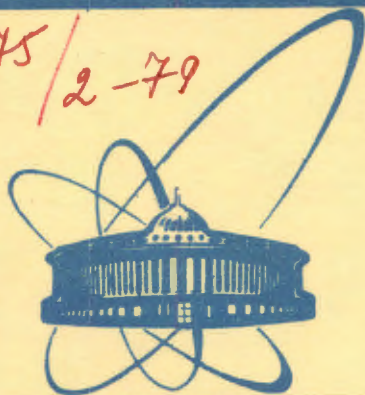


5175 / 2-79



сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
дубна

17/12-79

P9 - 12585

3-328

Н.Л.Заплатин, Н.А.Морозов

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕКТОРНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТА  
МОЩНОГО НЕЙТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА (М 1:7)

1979

Заплатин Н.Л., Морозов Н.А.

P9 - 12585

Моделирование секторного электромагнита мощного нейтронного генератора /М 1:7/

Разработана магнитная система кольцевого изохронного циклотрона с жесткой фокусировкой  $/1,2 < Q_r < 1,3; 1,3 < Q_z < 1,5/$ , предназначенного для ускорения дейтронов до энергии 35 МэВ с током пучка 10-100 мА. Приведены результаты экспериментальных исследований модели секторного магнита циклотрона в масштабе 1:7. Магнитные измерения проводились датчиком Холла с точностью 1%. Проведенные исследования подтвердили оптимальность выбранной конфигурации магнитопровода. Показано, что наиболее эффективным способом получения требуемой зависимости среднего магнитного поля является изменение угловой протяженности полюса, а также использование шимм, расположенных на боковой поверхности полюса. Среднее магнитное поле сформировано с точностью  $\pm 50$  Гс. Рассчитаны фокусирующие свойства магнитной системы, определены факторы, позволяющие эффективно изменять вариацию поля. Показана необходимость увеличения угловой протяженности полюса с  $25^\circ$  до  $31^\circ$  для получения фокусирующих свойств магнита в пределах допуска.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1979

Zaplatin N.L., Morozov N.A.

P9 - 12585

Modelling of Sector Magnet of Powerful Neutron Generator (Scale 1:7)

The problem of creation of the magnetic system of the separated sector ring isochronous cyclotron with strong focusing ( $1.2 < Q_r < 1.3; 1.3 < Q_z < 1.5$ ) which will accelerate deuterons up to an energy of 35 MeV with a 10-100 mA beam current is investigated. The experimental results obtained with the model of sector magnet in a scale 1:7 are presented. The magnetic measurements were performed by the Hall probe with the accuracy of about 1 percent. The investigation has proved the optimum of the configuration of the magnet yoke. It is shown that the change of the sector angle and the use of pole side shimmes are most effective methods of obtaining the required isochronous average field. The average magnetic field is formed with  $\pm 50$  G error. The focusing properties of the magnet system have been calculated and the factors effecting the flutter of the magnetic field have been evaluated. The necessity is shown of sector angle increasing from  $25^\circ$  to  $31^\circ$  for realizing the required limits of the magnet focusing properties.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

Генерирование мощных нейтронных потоков может быть осуществлено на основе циклического ускорителя дейтронов на энергию 35 МэВ с током пучка 10-100 мА<sup>1/</sup>. Циклический ускоритель представляет собой кольцевой изохронный циклотрон с жесткой фокусировкой  $/1,2 < Q_r < 1,3; 1,3 < Q_z < 1,5/$ . В работе<sup>1/</sup> приведены предварительные результаты по выбору параметров и схемы магнитной системы циклотрона, которая содержит 4 секторных С-образных электромагнита с прямолинейными образующими. В данной работе приведены результаты первоначального моделирования магнитной системы этого циклотрона при помощи секторного электромагнита с коэффициентом подобия 1:7. При моделировании в качестве главных критериев для выбора тех или иных решений по формированию требуемого магнитного поля  $/\bar{B}(r_{и}) = 4,95$  кГс,  $r_{и}$  - радиус инжекции/ являлись вес и мощность питания электромагнита.

## 1. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Первоначальная геометрия исследованной модели электромагнита показана на рис. 1. Она состоит из верхнего и нижнего ярм, стойки, полюсных накладок и обмотки возбуждения. Межполюсный зазор равен 7,1 мм. Обмотка возбуждения выполняется из двух последовательно соединенных витков /нижнего и верхнего/, каждый из которых набран из 4 медных трубок квадратного сечения 8,5x8,5 мм с отверстием для охлаждения  $\varnothing 5$  мм. Максимально допустимый ток равен 12 кА, плотность тока по меди  $J_M = 60$  А/мм<sup>2</sup>, средняя плотность тока  $\bar{J} = 45$  А/мм<sup>2</sup>. Питание обмотки возбуждения осуществляется от стандартного выпрямителя типа ВАК-12500-12-4.

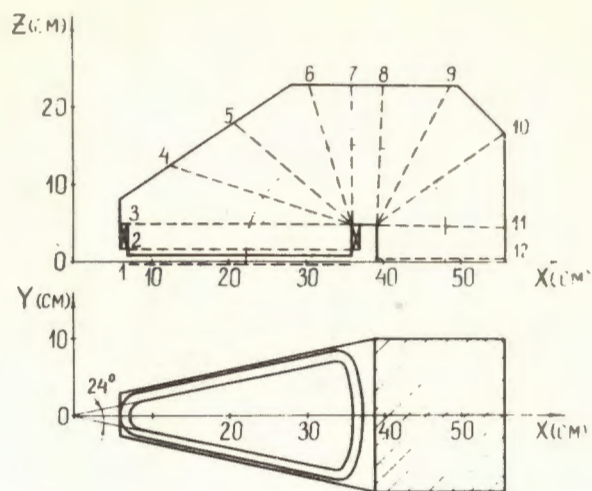


Рис. 1. Модель секторного магнита нейтронного генератора.

## 2. СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ И ПРОГРАММЫ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения магнитного поля проводились с помощью холлового магнитометра в средней плоскости зазора электромагнита. Датчик устанавливался на штангу, которая перемещалась в диапазоне азимутальных углов  $0-45^\circ$ /начало отсчета совпадает с осью электромагнита/ с шагом  $0,5^\circ$ . Радиальный шаг измерений составлял 1 см. Полная топография поля обычно измерялась в 2700 точках. Информация регистрировалась на перфокартах<sup>2/</sup>, затем обрабатывалась на ЭВМ CDC-6500 при помощи трех программ, объединенных в один пакет:

1/ DATMYTN - программа гармонического анализа результатов измерений и расчета необходимого изменения угловой протяженности полюса для получения требуемого закона среднего магнитного поля.

2/ MONMYTN - программа расчета флаттера, показателя спада поля, частот вертикальных и радиальных бетатронных

колебаний, а также отклонения среднего от требуемого изохронного поля для измеренной топографии. Расчеты проводились по формулам, приведенным в работе<sup>3/</sup>.

3/ CYCLOPS - в этой программе путем интегрирования уравнений движения частицы находятся равновесные орбиты, определяются значения частот  $Q_z$ ,  $Q_r$ , а также частота обращения частицы, последнее дает возможность уточнить требуемое изохронное поле с учетом реально измеренной вариации магнитного поля.

Кроме этих трех программ, была возможность использовать программу сглаживания результатов измерений - TURMAD.

Угловой интервал, в котором измерялась топография поля, был ограничен  $45^\circ$ , а поля рассеяния экстраполировались в азимутальном направлении в виде линейно спадающих до нуля зависимостей с угловой протяженностью  $90^\circ$ . Для получения характеристик поля проводилась суперпозиция полей 4 секторов магнитной системы, в предположении отсутствия взаимного влияния. Точность моделирования по среднему полю  $\sim 3\%$  определялась точностью измерений  $\sim 1\%$  и способом суперпозиции полей секторных магнитов.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

### а/ Ядро магнита

Проведенные исследования показали, что первоначально выбранная конфигурация ядра магнита оказалась достаточно оптимальной. Измерение распределения потоков вдоль магнитной цепи проводилось с использованием той же методики, что и в работе<sup>4/</sup>. На рис. 1 показано положение измерительных катушек при определении потоков.

Измерения потоков в магните /рис. 2, табл. 1/ и кривых намагничивания /рис. 3/ показали, что сопротивление магнитопровода при рабочем токе возбуждения  $I_B = 7000$  А составляло  $30-40\%$  от общего сопротивления магнитной цепи. Потоки рассеяния вокруг обмотки составили  $\sim 20\%$  от общего потока, проходящего через среднюю плоскость магнита. Из табл. 1 видно, что для выбранной конфигурации магнитопровода при

Таблица I.

№ измерительной катушки	1	2	3	4	5	6
Средняя индукция В (кГс)	16,8	19,1	20,4	15,1	16,4	15,2
Магнитный поток $\Phi$ (мВб)	42,8	48,6	52,0	50,0	49,0	49,0
№ измерительной катушки	7	8	9	10	11	12
Средняя индукция В (кГс)	15,0	13,6	11,6	11,5	13,8	13,8
Магнитный поток $\Phi$ (мВб)	49,0	49,0	49,0	49,0	49,0	49,0

среднем уровне индукции в зазоре - 17 кГс полюс магнита находится в состоянии, близком к насыщению /индукция-20,5 кГс/. Сравнительно низкий уровень индукции - 13 кГс в вертикальной стойке магнита /сечения 11,12/ обусловлен тем, что отношение площади сечения вертикальной стойки к площади полюса было

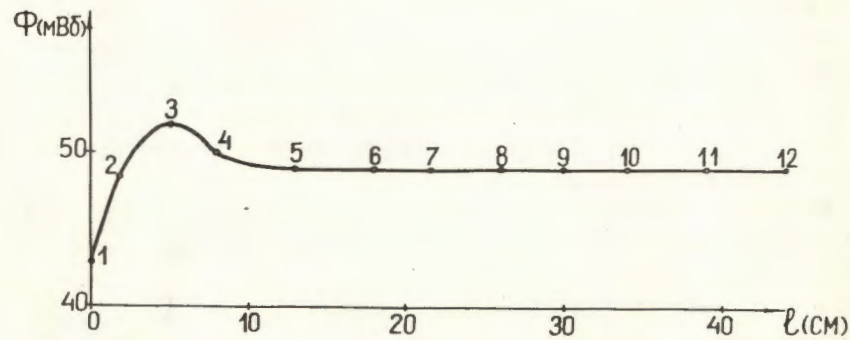


Рис. 2. Распределение потока вдоль магнитной цепи магнитопровода.

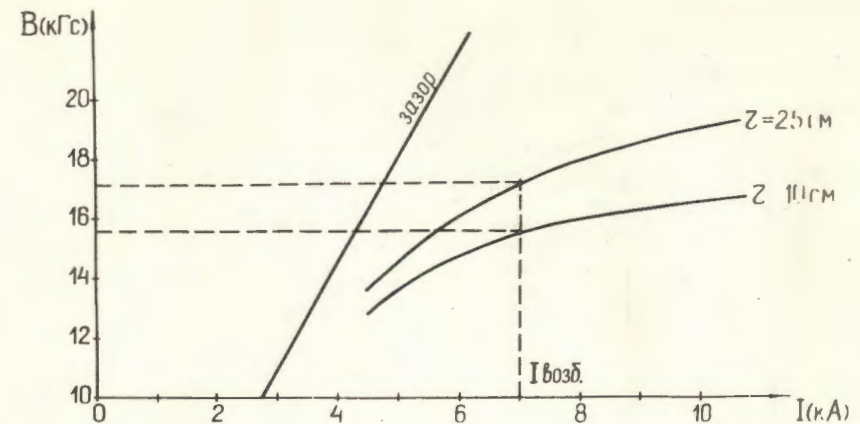


Рис. 3. Кривые намагничивания для выбранного магнитопровода.

выбрано равным 1,4. Как показали эксперименты, снижение этого отношения до единицы приводит к необходимости увеличения тока возбуждения обмотки на 9%, что не может быть оправдано экономией 20% железа.

#### б/ Среднее магнитное поле

На рис. 4 изображены результаты по формированию среднего магнитного поля от радиуса. Для начальной геометрии магнита наблюдается спад во всем диапазоне рабочих радиусов /кривая 1/. Путем изменения угловой протяженности полюсных накладок с 24' до 25' и положения вершины угла с  $r=0$  в точку  $r=1,23$  см удалось получить нужную форму поля в области радиусов 10-20 см /кривая 2/. Для шиммирования среднего поля в области радиусов 20-33 см были использованы две возможности:

- 1/. Профилирование полюсных накладок по высоте.
- 2/. Изменение угловой протяженности полюсных накладок путем использования шимм, расположенных на боковой поверхности.

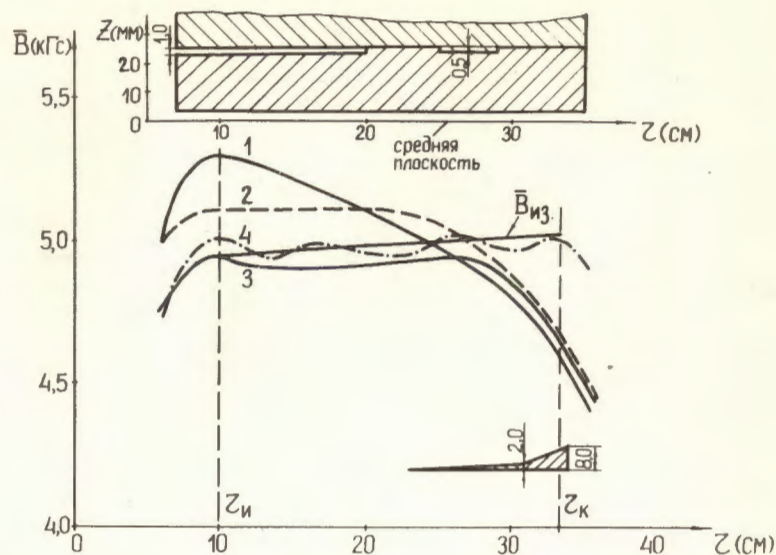


Рис. 4. Среднее поле для модели магнита:  $\bar{B}_{из}$  - изохронное поле, 1 - начальная геометрия магнита, 2 - измененная геометрия полюсных накладок ( $\alpha_n = 25^\circ$ ), 3 - профилирование полюсных накладок по высоте  $h_2$ , 4 - изменение угловой протяженности полюса с помощью боковых накладок.

Кривая 3 /рис. 4/ показывает результат эксперимента по профилированию полюсных накладок по высоте  $h_2$  /геометрия показана в верхней части этого же рисунка/.

Можно видеть уменьшение зоны неотшуммированного поля до области радиусов  $27 \div 33$  см, однако требуемый ток возбуждения при этом увеличивается на 10%. Полное шуммирование поля во всем диапазоне рабочих радиусов потребует увеличения тока возбуждения на 20%. Исходя из этих результатов этот способ шуммирования среднего поля был признан неэффективным.

Метод шуммирования среднего поля путем изменения азимутальной протяженности полюса при помощи боковых накладок не требует увеличения тока возбуждения магнита, а также обладает более высокой оперативностью. Кривая 4 /рис. 4/ показывает результаты по формированию поля с помощью боковых накладок, сечения которых приведены в нижней части

рис. 4. Высота боковых накладок равна высоте всего полюса. Можно видеть, что при этом достигается точность шуммирования среднего поля  $\pm 50$  Гс. Дальнейшее шуммирование может осуществляться с помощью аналогичных шумм, размещенных на выступающей части полюса.

На рис. 5 показаны азимутальные распределения поля для данной геометрии магнита, измеренные в плоскости  $z = 0$ .

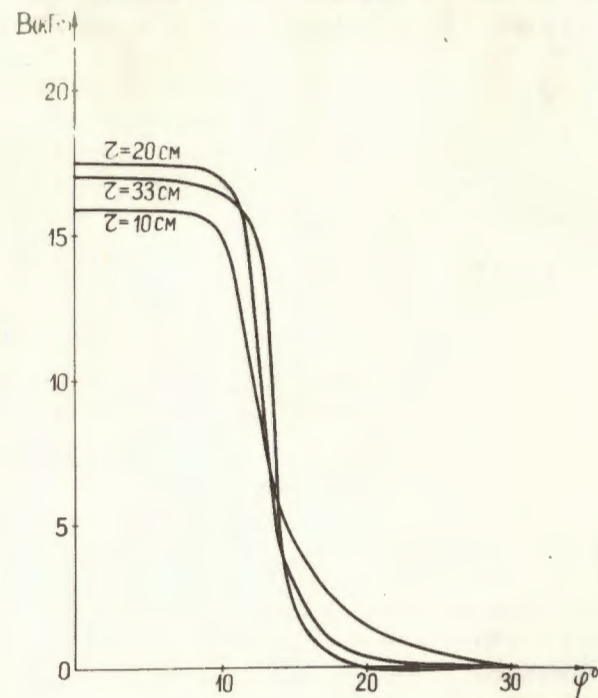


Рис. 5. Азимутальное распределение поля в медианной плоскости.

#### в/ Частоты свободных колебаний

На рис. 6 приведены зависимости флаттера  $F$  и частот бетатронных колебаний  $Q_z$ ,  $Q_r$ , рассчитанные для топографии поля посредством соответствующей кривой 4 /рис. 4/. Видно, что данный вариант магнита приводит к превышению верхней

границы частоты аксиальных колебаний на величину  $\sim 0,2$ . Изменение вертикального положения обмотки возбуждения магнита на величину  $\sim 20\%$  ее высоты приводит к общему снижению уровня  $Q_z$  на величину  $\sim 0,05$ , что недостаточно для получения  $Q_z$  в пределах допуска. Для уменьшения величин аксиальных колебаний  $Q_z$  до требуемых значений наиболее эффективным методом является изменение угловой протяженности полюса. В верхней части рис. 6 приведена зависимость частоты  $Q_z$  от величины угловой протяженности полюса  $\alpha$  для  $r = 20$  см, при

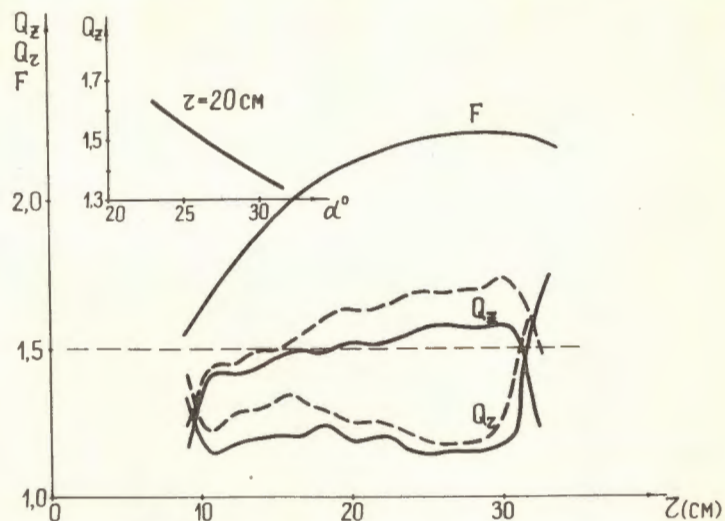


Рис. 6. Характеристики магнитного поля модели магнита: — — — расчет по аналитическим формулам, - - - - - расчет по программе CYCLOPS.

условии постоянства среднего поля. Видно, что для изменения положения кривой  $Q_z$  на величину  $0,2$  необходимо увеличить угловую протяженность полюса с  $25^\circ$  до  $31^\circ$ , при этом рабочий ток возбуждения уменьшается на  $20\%$ , а поле в зазоре составляет  $\sim 14$  кГс. Последнее обстоятельство позволит также уменьшить вес магнита за счет уменьшения сечения вертикального и горизонтального ярма.

Расчеты по программе CYCLOPS показали также существование устойчивых замкнутых орбит для сформированного поля в требуемом диапазоне энергий дейтронов  $3-35$  МэВ.

#### 4. ВЫВОДЫ

Проведенные исследования на модели секторного магнита дейтонного изохронного циклотрона позволили:

1. Оценить степень оптимальности выбора конфигурации ярма магнита.

2. Определить эффективность различных способов получения требуемых зависимостей среднего магнитного поля  $\bar{B}$  и частоты аксиальных колебаний  $Q_z$ , при этом показано, что наиболее эффективным способом является изменение угловой протяженности полюса электромагнита.

Результаты данных исследований могут быть использованы для дальнейшей разработки магнитной системы дейтонного изохронного циклотрона, а также при разработке магнитных систем кольцевых циклотронов на основе секторных магнитов с прямолинейными образующими.

Авторы благодарят Ю.Г.Аленицкого за помощь на начальной стадии работы, И.А.Голубева, Н.Н.Жукова, И.В.Куканова за большой объем работы по созданию модели секторного магнита и Г.Н.Сайфулину - за помощь при проведении магнитных измерений и оформление результатов работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Адо Ю.М. и др. Труды V Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. "Наука", М., 1977, т. II, с. 317.
2. Гавриш П.П. и др. ОИЯИ, 10-11645, Дубна, 1978.
3. Аленицкий Ю.Г. и др. ОИЯИ, P9-10091, Дубна, 1976.
4. Заплатин Н.Л., Самсонов Е.В., Чеснов А.Ф. ОИЯИ, 9-11533, Дубна, 1978.

Рукопись поступила в издательский отдел  
25 июня 1979 года.