

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



7412

ЭИЯ. ЧИТ. 89

P9 - 7412

Ю.Г. Аленицкий, С.Б. Ворожцов, Н.Л. Заплатин

РАСЧЕТЫ МЕТОДОМ СЕТОК  
ЦЕНТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ  
МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ У-120М

**1973**

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

P9 - 7412

Ю.Г. Аленицкий, С.Б. Ворожцов, Н.Л. Заплатин

РАСЧЕТЫ МЕТОДОМ СЕТОК  
ЦЕНТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ  
МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ У-120М

**Научно-техническая  
библиотека  
ОИЯИ**

При разработке магнитной системы У-120М важным является выбор такой конфигурации системы спиральных шимм, которая обеспечивала бы минимальное относительное изменение магнитных полей при изменении уровня индукции.

В работах /1,2/ показано, что для центральной области магнитной системы это можно достичь путем изменения угловой протяженности спиральных шимм и использования аксиальных пазов в них. При этом утверждается, что "... аксиальные пазы в спиральных шиммах ... играют роль переменных сопротивлений для горизонтального магнитного потока, причем максимальное их воздействие проявляется при низких индукциях".

Настоящая работа посвящена полуколичественной интерпретации упомянутого эффекта путем расчета центральной области магнитной системы У-120М методом сеток в двумерном приближении /3/.

На рис. I пунктирной линией показана граница области расчета, проведенная на общей схеме магнитной системы /2/.

Начальное приближение значения векторного потенциала в узлах сетки задано в виде  $A = B_0 \tau$ , что соответствует однородному полю.

Исходное значение магнитной проницаемости для области ферромагнетика взято  $\mu = 500$ . Граничные условия имеют вид:

$$A = 0 \quad \text{при} \quad \tau = 0,$$

$$A = B_0 \tau_0 \quad \text{при} \quad \tau = \tau_0,$$

$$\frac{\partial A}{\partial z} = 0 \quad \text{при } z = 0,$$

$$A = B_0 z \quad \text{при } z = z_0,$$

где  $B_0$  - уровень магнитной индукции, гс,

$z_0$  - максимальный радиус области расчета, см,

$z_0$  - максимальное значение координаты  $z$ , см.

Расчет проводился при  $z_0 = 35$  см,  $z_0 = 19$  см,  $B_0 = 10000$  гс, и  $B_0 = 22700$  гс.

Построение нерегулярных треугольных сеток размером  $36 \times 21$  узлов для геометрии спиральной шиммы без пазов и с пазами производилось с помощью программ *MAN 1* и *CALCOM* на ЭВМ БЭСМ-6. Графическое изображение сеток было получено на графопостроителе фирмы "*CALCOMP*".

Для выполнения условия  $\frac{\partial A}{\partial z} = 0$  и сохранения единообразия расчетной разностной схемы вводилась дополнительная полоса узлов сетки, ограниченная линиями  $z = 0$  и  $z = -1$ . В треугольниках этой полосы полагалось условие  $\frac{1}{\mu} = 0$ .

Расчеты распределения векторного потенциала  $A$  и проницаемости  $\mu$ , соответствующей получаемому  $\text{grad} A$ , проводились по программе *TRIMD* и заканчивались при достижении значения нормы относительного изменения  $A$ , равного  $2 \cdot 10^{-6}$ . Построение распределений силовых линий и геометрии задачи выполнялось на графопостроителе при помощи программы *EQUIP*.

Результаты расчетов для шиммы с пазами и без пазов при двух предельных уровнях индукции представлены на рис.2-9.

Сравнивая рис.2 и 3, можно заметить значительное увеличение горизонтальной составляющей потока на низком уровне индукции, что приводит к всплеску поля в медианной плоскости на малых радиусах.

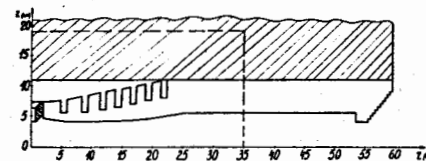


Рис.1. Выделение области расчета на общей схеме геометрии полюсного наконечника.

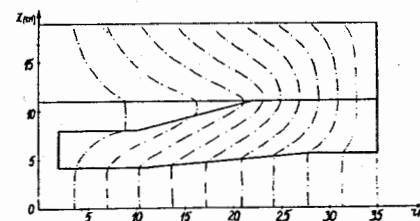


Рис.2. Шиммы без пазов. Распределение магнитных силовых линий для  $B_0 = 10$  кгс.

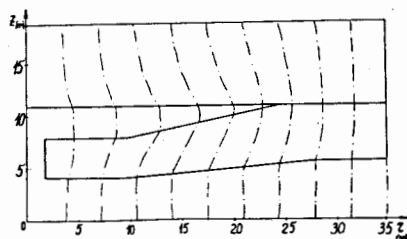


Рис.3.  
Шиммы без пазов.  
Распределение силовых  
линий при  $B_0=22,7$  кгс

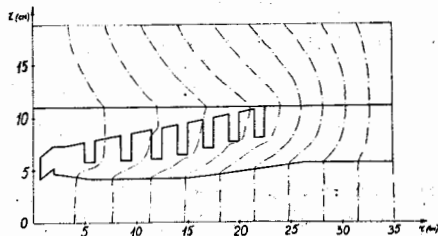


Рис.4.  
Шиммы с пазами.  
Распределение силовых  
линий при  $B_0=10$  кгс

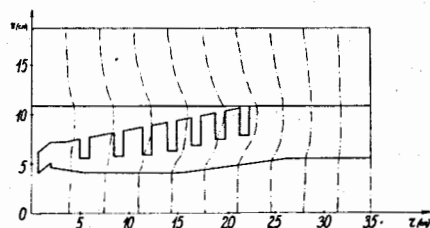


Рис.5.  
Шиммы с пазами.  
Распределение силовых  
линий при  $B_0=22,7$  кгс

(рис.10). Из рис.2 и 4 видно, что введение вертикальных пазов способствует распрямлению силовых линий и уменьшению доли потока, попадающей в центр с больших радиусов при низких индукциях.

Таким образом, в случае шимм с пазами (рис.4,5) наблюдается менее резкое изменение картины силовых линий при переходе от низкого уровня индукции к высокому.

На рис.6 и 7, где представлены распределения магнитных проницаемостей для шиммы без пазов, видна причина изменения направления потока в шимме при изменении уровня индукции. При  $B_0=10$  кгс (рис.6) наблюдается резкое увеличение проницаемости при переходе с больших радиусов на меньшие. Градиент  $\frac{d\mu}{dr}$  имеет значение  $-250$  I/см в районе  $z=7$  см. Поэтому силовые линии идут в центр. На высоком уровне индукции (рис.7) происходит насыщение края шиммы, и значения  $\mu$  в большей части шиммы не превышают 10, причем наблюдается почти равномерное распределение проницаемости.

В этом случае градиент  $\frac{d\mu}{dr}$  приблизительно равен  $-2 \frac{1}{\text{см}}$  на большей части центральной области шиммы. В этих условиях не наступает изменения направления силовых линий в сторону центра, что приводит к спаду поля в области малых радиусов.

Аналогичные распределения  $\mu$  при тех же уровнях индукции для шиммы с пазами представлены на рис.8 и 9. Сравнивая рис.6 и 8, относящиеся к низкой индукции, замечаем следующее:

1. Распределения в полюсе имеют примерно одинаковый вид.
2. Центральная часть шиммы не насыщена.
3. На рис.8 оказались не насыщенными зубцы шиммы, но так как имеются вертикальные пазы, то прохождение силовых линий в этой области возможно, преимущественно, в вертикальном направлении. Наличие таких ненасыщенных зубцов способствует равномерному прохождению потока через зазор полюс - спиральная шимма, а не через область соприкосновения шиммы с полюсом.

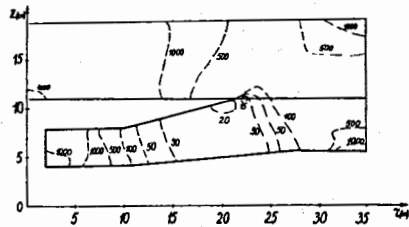


Рис.6.  
Шиммы без пазов.  
Распределение функции  
проницаемости при  
 $B_0 = 10$  кгс.

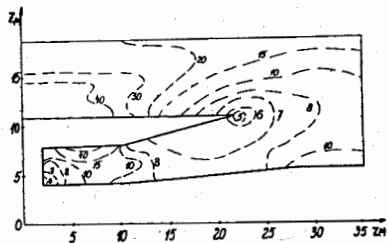


Рис.7.  
Шиммы без пазов.  
Распределение магнитной  
проницаемости  
при  $B_0 = 22,7$  кгс.

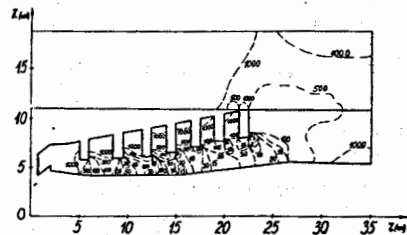


Рис.8.  
Шиммы с пазами.  
Распределение проницаемости при  $B_0 = 10$  кгс.

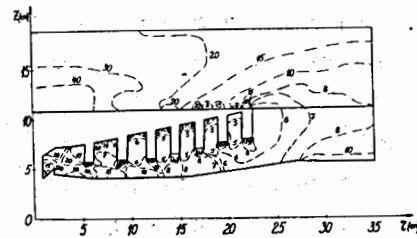


Рис.9.  
Шиммы с пазами.  
Распределение проницаемости при  $B_0 = 22,7$  кгс.

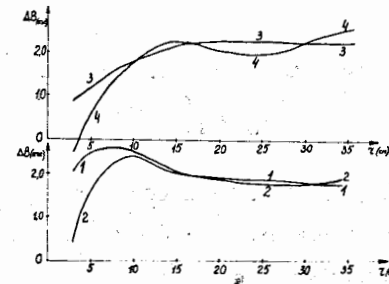


Рис.10. Напряженность  
расчетного магнитного  
поля в медианной плоскости.  
1 -  $B_0 = 10$  кгс  
2 -  $B_0 = 22,7$  кгс  
Шиммы без пазов.  
3 -  $B_0 = 10$  кгс  
4 -  $B_0 = 22,7$  кгс  
Шиммы с пазами.

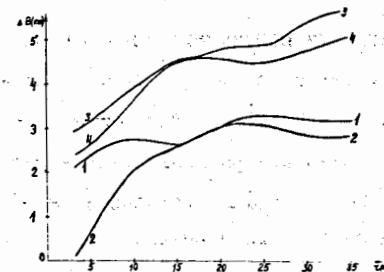


Рис.11.  
напряженность экспери-  
ментального магнитного  
поля в холме. Обозначения  
кривых аналогичны рис.10.

4. О концентрации потока в полюсе в области зубцов свидетельствует уменьшение проницаемости полюса в районах, противоположных зубцам, и увеличение проницаемости полюса над пазами (эффект отражения).

5. Общее состояние части шиммы, расположенной под пазами, характеризуется пониженным средним значением проницаемости при том же уровне возбуждения ( $\bar{\mu} = 15$  вместо  $\bar{\mu} = 30$ ), что затрудняет отклонение силовых линий в горизонтальном направлении. Кроме того, вблизи правого угла каждого паза возникает зона особенно малого значения  $\mu$ , достигающего  $\mu = 6$ , что как бы приводит к удлинению паза в теле шиммы.

6. Радиальные градиенты  $\mu$  в части шимм под пазами значительно меньше, чем в шимме без пазов  $\frac{d\mu}{dr} \approx -30 \frac{1}{\text{см}}$  вместо  $\frac{d\mu}{dr} \approx -250 \frac{1}{\text{см}}$ . При высоком уровне индукции (рис.9) зубцы шиммы насыщаются примерно одинаково с нижней частью шиммы. Горизонтальные потоки так же, как и в шимме без пазов, при этом затруднены.

В центральной области существует менее насыщенный район. Следует отметить область повышенного значения  $\mu$  в теле шиммы непосредственно под пазом, а также более выраженный эффект отражения пазов и зубцов в полюсе.

Расчетные распределения напряженности магнитного поля в медианной плоскости для рассмотренных случаев приведены на рис.10. Кривые попарно совмещены по уровню поля на  $\zeta = 16$  см. Для шиммы с пазами (кривые 3 и 4) наблюдается уменьшение разницы полей в диапазоне радиусов 3-10 см на величину  $\approx 300$  э, а также исчезновение всплеска поля за счет горизонтальной составляющей потока.

Оставшийся разброс полей, по-видимому, объясняется перераспределением в центральной части полюса доли потока, пересекающего зазор полюс - спиральная шимма, что видно из картины распределения силовых линий на рис.4 и 5. При введении гребенчатой структуры в полюсе, отвечающей структуре в шимме, по-видимому, удалось бы еще больше снизить разброс полей в центре.

На рис.11 приведены экспериментальные значения поля в холме для рассматриваемых конфигураций и уровней возбуждения. Сравнение с расчетными данными указывает на совпадение характера рассматриваемых зависимостей, однако в диапазоне  $\zeta = 30 - 35$  см наблюдаются заметные искажения, связанные с искусственным условием отсутствия потока через правую границу, принятым в расчетной схеме.

В заключение необходимо отметить, что приведенные расчеты не могут претендовать на полное количественное описание трехмерной структуры центра магнитной системы, а служат лишь моделью для выяснения физических явлений в этой части магнитной системы. Ввиду двумерности расчетной геометрии и принятых граничных условий характер расчетных распределений напряженности поля в медианной плоскости отличается от экспериментальных значений поля в холме. Однако расчетная модель позволяет судить о направлении изменения зависимости напряженности поля и распределения  $\mu$  в железе при тех или иных изменениях геометрии системы.

Улучшение расчетной модели может быть достигнуто за счет следующего:

- 1) изменение граничных условий путем задания постоянного потока на верхней горизонтальной границе,
- 2) введение угловой протяженности спиральной шиммы в разностную схему для учета влияния долин при распределении потоков,

3) последовательный расчет всего магнита при плоском поле, а затем расчет выделенной области, при заданных граничных условиях, на основе I-го расчета;

4) учет степени концентрации потока в шимме путем расчета конфигурации, получающейся при азимутальном сечении системы.

Рассмотренная методика может быть использована при расчете краевого эффекта магнитной системы. Кроме того, такого рода расчеты могут полностью заменить экспериментальные данные при моделировании спиральных шимм системой бесконечных прямолинейных брусков<sup>/4/</sup>.

Авторы благодарят Т.Н.Дудареву за помощь при оформлении работы.

#### Литература

1. Ю.Г.Аленицкий, С.Б.Ворожцов, Н.Л.Заплатин, А.А.Кропин. ОИЯИ, Р9-6241, стр.15-25, Дубна, 1972г.
2. Ю.Г.Аленицкий, Н.Л.Заплатин, А.А.Кропин, Н.А.Морозов. Формирование магнитного поля изохронного циклотрона У-120М. Материалы III рабочего совещания по изохронному циклотрону У-120М, Ческе БудеЙовице, ЧССР, 14-18 мая 1973 г. Изд.ОИЯИ, Р9-7339, Дубна, 1973.
3. С.Б.Ворожцов, Л.Т.Закамская, Н.Л.Заплатин, ОИЯИ, Р9-5013, Дубна, 1970г.
4. С.Б.Ворожцов, Н.И.Дьяков, Н.Л.Заплатин ОИЯИ, 9-4517, Дубна, 1969г.

Рукопись поступила в издательский отдел  
30 августа 1973 года.