

## МАГНИТНАЯ СИСТЕМА ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО БЕТАТРОНА

В.А.Касьянов, В.А.Романова, В.Л.Чахлов  
Научно-исследовательский институт интроскопии  
Томского политехнического института

В настоящее время достигнуты определенные успехи в области повышения мощности экспозиционной дозы тормозного излучения бетатронов [1]. Работы по увеличению ускоряемого заряда бетатронов проводятся по нескольким направлениям, среди которых наиболее перспективным является создание новых типов циклических индукционных ускорителей электронов с повышенной интенсивностью излучения.

Представляет интерес применение управляемого магнитного поля типа пробоочных магнитных ловушек при ускорении электронов. В [2] предложена конструкция электромагнита бетатрона, названного цилиндрическим, в котором с помощью ферромагнитных радиально-гребневых полюсов I (рис.1), центральных вкладышей

2, а также распределенных витков намагничивающей обмотки 3, расположенных на расстоянии  $\rho$  от магнитопровода 4, формируется управляемое магнитное поле, обеспечивающее устойчивое движение электронов при ускорении в рабочем зазоре с большим отношением аксиального размера рабочей области к радиальному. На рисунке показана четвертая часть геометрии магнитной системы;  $\ell$  - радиальный размер намагничивающей обмотки. Расстояние  $\rho$  выбирается таким, чтобы, с одной стороны, неоднородность поля в рабочем зазоре была незначительной, с другой стороны, обеспечивалось заданное пробоочное отношение  $q$  управляемого поля:

$$q = \frac{B_{z\max}(r, z)}{B_{z0}(r, z=0)}, \quad (I)$$

где  $B_{z\max}$  - максимальное значение компоненты магнитного поля вблизи полюса в рабочем зазоре;

$B_{z0}$  - максимальное поле в медианной плоскости.

В цилиндрическом бетатроне равновесные орбиты расположены так близко друг к другу, что их можно рассматривать как одну равновесную поверхность  $C = \text{const}$ , на которой выполняется основное бетатронное соотношение 2:1. Положение этой поверхности регулируется блоком центральных вкладышей.

При создании действующей модели бетатрона новой конструкции проведены исследования структуры формируемого управляемого магнитного поля в зависимости от параметров магнитной системы.

Вычисления компонент поля  $B_r$  и  $B_z$  в рабочем зазоре ускорителя, обозначенном на рис.1 пунктиром, проводились численно прямым интегральным методом [3] на ЭВМ ЕС-1033. Элементом разбиения ферромагнетика являлся треугольник (рис.1). Свойство симметрии рассматриваемого магнитного поля относительно медианной плоскости позволило исследовать поле только в первом квадранте плоскости ( $r, z$ ).

В качестве магнитного материала использовалась электротехническая сталь Э-330 [4]. Неоднородность ферромагнетика блока центральных вкладышей и магнитопровода учитывалась по формулам для магнитной проницаемости в простой неразветвленной и разветвленной магнитной цепи [5].

Из численных экспериментов следует, что величина пробоочного отношения магнитного поля вблизи полюса зависит от параметра  $\rho$  (рис.1) - при приближении обмотки к верхней границе ферромагнетика поле начинает резко возрастать уже вблизи медианной плоскости. На рис.2 показано изменение пробоочного отноше-

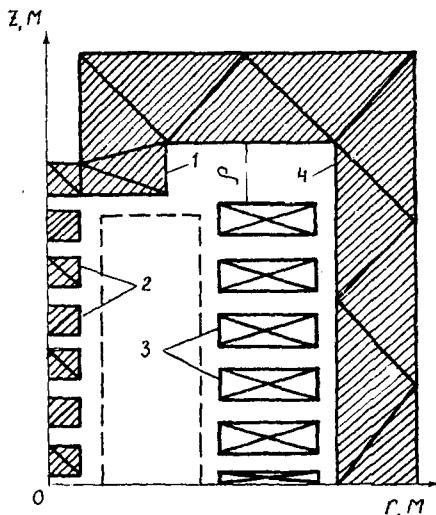


Рис. 1

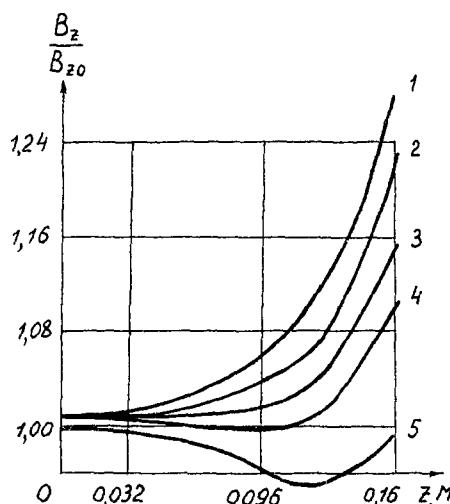


Рис. 2

ния (1), полученное численным методом, в зависимости от величины  $\rho$ : 1 -  $\rho = 0,007$  м; 2 -  $\rho = 0,017$  м; 3 -  $\rho = 0,027$  м; 4 -  $\rho = 0,037$  м; 5 -  $\rho = 0,047$  м.

Величина пробочного отношения практически не зависит от ширины катушки  $\ell$ , при фиксированном положении ее относительно рабочей области, и количества элементов ферромагнетика в блоке центральных вкладышей. Поле однородно в аксиальном направлении от медианной плоскости, далее наблюдается небольшая бочкообразность поля, около полюса расхождение численных и экспериментальных результатов составляет  $\sim 5\%$ .

Численное изучение управляющего магнитного поля цилиндрического бетатрона позволило выбрать параметры магнитной системы электромагнита ускорителя.

Для оценки возможностей магнитной системы цилиндрического бетатрона по формированию управляющего магнитного поля заданной топографии, а также для экспериментальной проверки результатов теоретических исследований был изготовлен электромагнит, имеющий следующие параметры:

1. Максимальная энергия ускоренных электронов	- 3 МэВ
2. Диаметр полюсных наконечников	- 0,15 м
3. Расстояние между полюсными наконечниками	- 0,365 м
4. Внутренний диаметр намагничивающей катушки	- 0,200 м
5. Число секций катушки	- II.

Исследования магнитной системы показали следующее:

- Ограничение аксиального размера пучка электронов обеспечивается областями магнитных пробок вблизи полюсных наконечников. При величине пробочного отношения  $I_1 + I_4$  радиус равновесной орбиты остается в габаритах рабочего объема электромагнита.
- Применение гребневой полюсной системы обеспечивает добавку фокусирующих сил, действующих в аксиальном направлении. Величина азимутальной вариации поля на радиусе равновесной орбиты ( $R_0 = 60$  мм) вблизи полюсных наконечников составляет  $\sim 0,3$ .
- Коэффициент рассеяния магнитного потока практически не зависит от распределения секций намагничивающей катушки по высоте и для данного электромагнита составляет  $\sim 1,9$ .

4. Управляющее магнитное поле цилиндрического бетатрона обладает практически однородной фазовой структурой.

Получены соотношения, связывающие основные параметры управляющего магнитного поля электромагнита цилиндрического бетатрона, геометрические размеры рабочей области ускорителя и предельное число частиц, удерживаемых полем бетатрона.

На макете цилиндрического бетатрона проведены эксперименты по захвату и ускорению электронов. При напряжении инъекции 25 кВ максимальное число частиц, захватываемых в ускорение, равно  $\sim 1,8 \cdot 10^{12}$  при коэффициенте захвата  $\sim 10\%$ . Таким образом, средняя плотность частиц в рабочем объеме цилиндрического бетатрона на порядок выше, чем для известных бетатронов при той же энергии инъектируемых электронов.

Технико-экономический анализ данной конструкции показал, что ускоритель такого типа превосходит по удельным характеристикам (интенсивность на единицу массы, интенсивность на единицу мощности питания) бетатроны традиционного типа в области энергий ускоренных электронов выше 12 МэВ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Москалев В.А. Бетатроны. М.: Энергоиздат, 1981.
2. А.С. № 6055II (СССР). Электромагнит цилиндрического бетатрона. (Звонцов А.А., Филимонов В.А., Чахлов В.Л., Касьянов В.А. - Опубл. в ОИ., 1981, № 37).
3. Дзюба В.А., Карлинер М.М., Лысянский П.В., Фомель Б.М. Вычисление стационарных магнитных полей в системах с железом и без железа. - Новосибирск, 1977, 24 с. (Препринт ИЯФ СОАН СССР, с.77-123).
4. Дружинин В.В. Магнитные свойства электротехнической стали. - М., М.:Энергия,1974.
5. Калашников С.Г. Электричество. 4-е изд. - М.:Наука,1977.