

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 управляющего магнитного поля типа пробочных магнитных ловушек при ускорении электронов. В [2] предложена конструкция электромагнита бетатрона, названного цилиндрическим, в котором с помощью ферромагнитных радиально-гребневых полюсов 1 (рис.1), центральных вкладышей 2, а также распределенных витков намагничивающей обмотки 3, расположенных на расстоянии ρ от магнитопровода 4, формируется управляющее 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; ℓ - радиальный размер намагничивающей обмотки. Расстояние ρ выбирается таким, чтобы, с одной стороны, неоднородность поля в рабочем зазоре была незначительной, с другой стороны, обеспечивалась заданное пробочное отношение q управляющего поля:

$$q = \frac{B_{zmax}(r, z)}{B_{z0}(r, z=0)}, \quad (1)$$

где B_{zmax} - 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 $r_0 = const$, 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 управляющего 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 пробочного отношения магнитного поля вблизи полюса зависит от параметра ρ (рис.1) - при приближении обмотки к верхней границе ферромагнетика поле начинает резко возрастать уже вблизи медианной плоскости. На рис.2 показано изменение пробочного отноше-

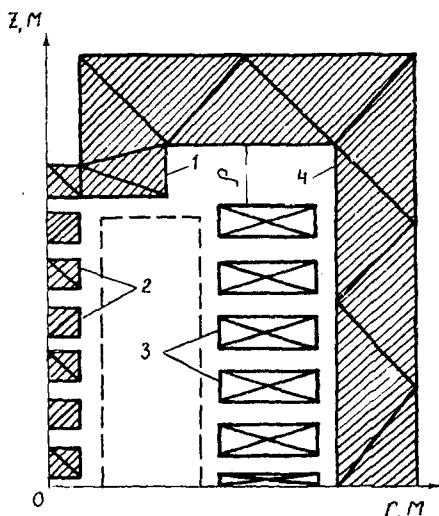


Рис. 1

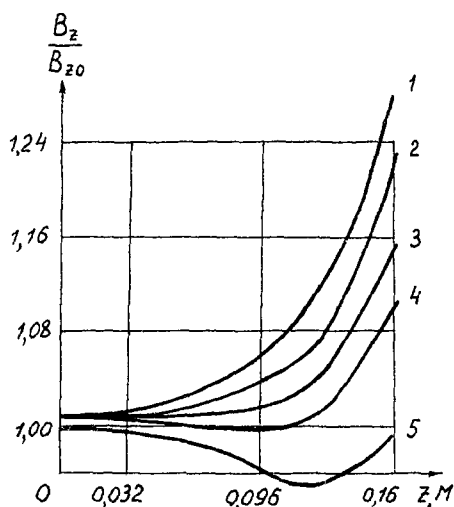


Рис. 2

ния (1), полученное численным методом, в зависимости от величины ρ : 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 ℓ , 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 боковая разность 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:

1. Ограничение аксиального размера пучка электронов обеспечивается областями магнитных пробок вблизи полюсных наконечников. При величине пробочного отношения $I+I,4$ радиус равновесной орбиты остается в габаритах рабочего объема электромагнита.
2. 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 $\sim 0,3$.
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 инжекции 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 инжектируемых 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.№ 605511 (СССР). Электромагнит цилиндрического бетатрона. (Звонцов А.А., Филимонов В.А., Чахлов В.Л., Касьянов В.А. - Оpubл. 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.