

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО ЦИКЛИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМ ВЕДУЩИМ ПОЛЕМ

В. Н. Канунников, П. С. Михалев

УДК 621.384.612

Описана методика и приведены результаты моделирования секторной магнитной системы с большими прямолинейными промежутками (без секторов отрицательного поля). С помощью численных расчетов по измеренному на моделях полю определены частоты бетатронных колебаний и другие параметры магнитной системы для индукционных ускорителей электронов с постоянным во времени ведущим полем на энергии 1,5 и 5,0 Мэв.

Первые теоретические исследования динамики частиц в магнитной системе без отрицательных секторов, предназначенной для индукционного циклического ускорителя с постоянным ведущим полем, проводились в предположении ступенчатой зависимости поля от азимута /1,2/. Для уточнения полученных ранее результатов проведено описанное ниже моделирование; частоты бетатронных колебаний и другие характеристики определены по реальному, измеренному на моделях, полю. При расчетах использовалось, как и ранее, распределение поля вида:

$$H(r, \theta) = H_0 \left(\frac{r}{R} \right)^n \left[f_0 + \sum_{k=1}^{\infty} f_k \cos(kN\theta) \right]. \quad (1)$$

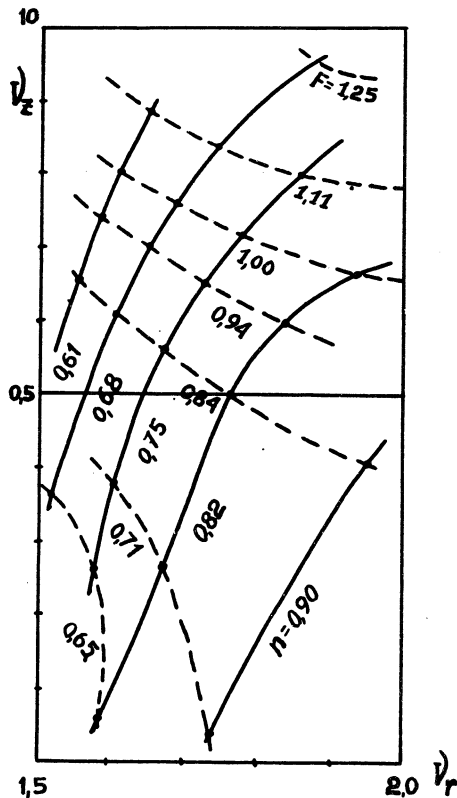
Флаттер

$$F = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{f_k^2}{f_0^2} \quad (2)$$

должен быть достаточно большим, чтобы обеспечить вертикальную устойчивость в растущем по радиусу поле ($n > 0$).

Магнитная система моделировалась в двух вариантах: $N = 4$ и $N = 6$. Значения n и F при расчете моделей выбраны на основе прежних результатов /1,2/. Область моделируемого поля соответст-

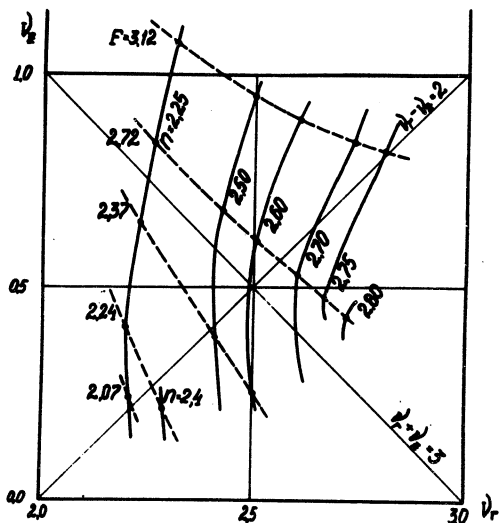
вует диапазону энергий 0,05–0,5 Мэв ($N = 4$) и 0,05–1,0 Мэв ($N = 6$). Геометрические размеры моделей определены, прежде всего, из условий получения необходимой величины F . Как и в электрон-



Р и с.1. Диаграмма устойчивости для $N = 4$. Линии постоянного показателя поля n – сплошные, постоянного флаттера F – пунктирные

ном кольцевом фазотроне [3], область формируемого поля разбита на две части: на малых радиусах рост поля обеспечивается распределенными обмотками, на больших – уменьшением вертикального зазора. В области распределенных обмоток вертикальный зазор и азимутальная ширина сектора увеличиваются пропорционально радиусу,

а ампервитки растут пропорционально r^{n+1} . В области профилированных полюсов зазор изменяется с радиусом в первом приближении обратно пропорционально амплитуде формируемого поля; при узких



Р и с.2. Диаграмма устойчивости для $N = 6$. Линии постоянного показателя поля n — сплошные, постоянного флаттера F — пунктирные

по азимуту секторов закон изменения зазора учитывает зависимость этой амплитуды от азимутальной ширины сектора (см./4/).

Модели состоят из двух ($N = 4$) и трех ($N = 6$) секторов, смонтированных на общем основании вместе с координатным механизмом для перемещения датчиков поля. Для магнитных измерений использовалась система с двумя датчиками Холла типа X5II (с размерами $2,0 \times 2,0 \times 0,3 \text{ мм}^3$), размещенными в общем корпусе; центры датчиков смещены друг относительно друга по радиусу на 10 мм. Абсолютная погрешность измерений $n \sim 1\%$, погрешность измерений N и относительных измерений n — в несколько раз лучше.

Измеренные на моделях при нескольких значениях радиуса и вертикального зазора зависимости $N(\theta)$ использовались при определении частот бетатронных колебаний ν_r, ν_z путем численного инте-

гирования точных связанных уравнений движения в поле вида (1) (см. /2/). Зависимости $n(\theta)$ характеризовались соответствующей величиной F , определявшейся по формуле (2). Результаты расчетов частот, полученные для $N = 4$, нанесены на диаграмму устойчивости (рис.1). Точки, соответствующие паре значений ν_r, ν_z , соединены на диаграмме линиями $n = \text{const}$ и $F = \text{const}$, с указанными около них значениями этих величин. Аналогичным образом рассчитаны ν_r, ν_z по результатам измерений поля при $N = 6$ (рис.2).

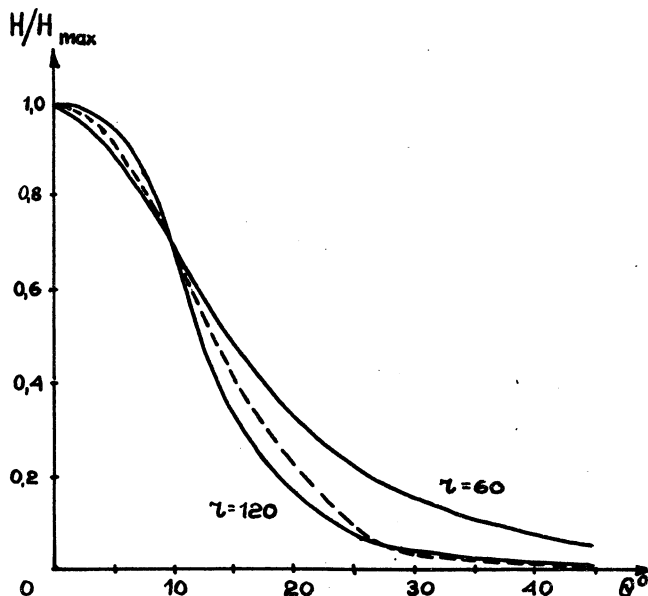
Таблица I

Параметры магнитной системы ускорителей на 1,5 и 5,0 Мэв

Макс. энергия электронов w_m (Мэв)	1,5	5,0
Энергия инжекции w_i (Мэв)	0,05	0,05
Число секторов N	4	6
Показатель поля n	$0,76 \pm 0,04$	$2,65 \pm 0,05$
Флаттер F	$1,0 \pm 0,15$	$2,9 \pm 0,2$
Частоты бетатронных колебаний:		
радиальных ν_r	1,8	2,6
вертикальных ν_z	0,7	0,75
Радиус орбиты инжекции r_i (см)	8	18
Радиус конечной орбиты r_m (см)	27	44
Макс. ведущее поле H_m (кэ)	0,5	2,8

Как видно из рис.1 и 2, можно выбрать рабочие точки, указанные в таблице I. Эти точки соответствуют максимальной (для рассматриваемых значений N) величине n и, следовательно, минимальной ширине кольца магнитной системы. Указанные в таблице значения отклонений n и F относятся к полю без азимутальных искажений и предполагают одинаковые Δn на всех азимутах. Если допустить возможность пересечения в процессе ускорения резонансов связи $\nu_r - \nu_z = 2$ ($N = 6$) и $\nu_r - \nu_z = 1$ ($N = 4$), то приведенные значения Δn можно увеличить примерно вдвое. Судя по опыту работы электронного кольцевого фазотрона /3/, у которого допуска на магнитное поле были примерно на порядок жестче, формирование поля рассматриваемых ускорителей не вызовет затруднений.

При моделировании опробованы методы коррекции распределений $F(r)$ и $n(r)$ до указанных выше допусков. В области краевого эффекта, на начальных радиусах, искажения n компенсировали допол-



р и с.3. Пример коррекции экранами азимутальной формы поля $H(\theta)$ в модели $N = 4$. Для кривой на радиусе $r = 120$ мм флаттер $F = 1,08$; сплошная кривая при $r = 60$ мм (без экранов) соответствует $F = 0,65$. Пунктирная кривая получена на том же радиусе $r = 60$ мм после коррекции формы поля с помощью экранов; в этом случае $F = 1,00$

нительными витками распределенных обмоток; F и n на больших радиусах подгоняли, корректируя форму профилированных полюсов. На малых радиусах F весьма просто изменять с помощью магнитных экранов, закрывающих радиальные проводники обмоток со стороны прямолинейного промежутка. Малая величина поля позволяет сделать эти экраны тонкими и варьировать F , изменяя зазор между верхним и нижним экранами (см. рис.3).

Авторы выражают искреннюю благодарность Г. И. Харламовой за помощь в получении результатов численных расчетов. Авторы благодарят также А. А. Косарева и Л. Н. Чеканову, принимавших участие в магнитных измерениях.

Поступила в редакцию
13 июня 1975 г.

Л и т е р а т у р а

1. В. Н. Канунников, А. А. Коломенский, П. С. Михалев, А. П. Фатеев. Атомная энергия, 38, 234 (1975).
2. В. Н. Канунников, А. А. Коломенский, П. С. Михалев, А. П. Фатеев. Препринт ФИАН № 58, 1974 г.
3. В. Н. Канунников, А. А. Коломенский, А. Н. Лебедев, Е. П. Овчинников, А. П. Фатеев, Б. Н. Яблоков. ПТЭ, № 5, 71 (1967).
4. В. Н. Канунников, П. С. Михалев. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 3, 16 (1975).