

## К РАСЧЕТУ ВНЕШНЕЙ ИНЖЕКЦИИ В ИНДУКЦИОННЫЙ ЦИКЛИЧЕСКИЙ УСКОРИТЕЛЬ С ПОСТОЯННЫМ ВЕДУЩИМ ПОЛЕМ

В.Н. Канунников\*, П.С. Михалев

*Изложена методика и приведены некоторые результаты численных расчетов траекторий электронов при внешней инжекции в индукционный циклический ускоритель.*

В индукционном циклическом ускорителе (ИЦУ) применяется четырехсекторная магнитная система с растущим по радиусу ведущим полем. Постоянство поля во времени и применение высокого ускоряющего напряжения ( $\geq 10^2$  В/оборот) позволяет получить большой средний ток ускоренного пучка (до десятков мкА) /1-5/. При размещении инжектора (электронной пушки) внутри орбиты инжекции со средним радиусом  $\sim 8$  см возникает ряд трудностей, связанных с необходимостью расположить еще индукционные сердечники и элементы конструкции вакуумной камеры. Поэтому целесообразно рассмотреть возможность инжекции из области вне орбиты максимальной энергии, по траекториям дрейфа вдоль границы магнитного сектора, подобно инжекции ионов в секторный циклотрон /6/.

При численных расчетах траекторий область магнитного поля разбивали на кольцевые участки шириной по радиусу 1 см, поле в  $i$ -том кольце представляли зависимостью вида:

$$H_i(r, \theta) = H_0 \sum_{k=0}^m (r/R_{0i})^{n_{ik}} f_{ik} \cos(kN\theta), \quad (1)$$

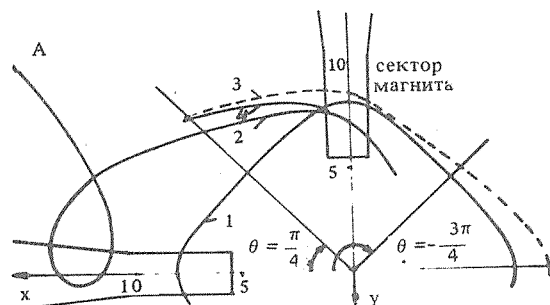
в которой  $R_{0i} = r_{\min} + i$ ,  $i = \text{Entier}(r - r_{\min} + 0,5) - 1$ ,  $i = 1, 2, \dots, 24$ . Параметры  $f_{ik}$  и  $n_{ik}$  предварительно определяли по данным измерений поля (через 1 см по радиусу  $r$  и через  $5^\circ$  по азимуту  $\theta$ ), вычисляя амплитуды гармоник Фурье  $f_k$  и их показатели  $n_k = (f_k/r) (df_k/dr)$ . Расчеты траекторий вели с учетом членов до  $m = 3$  включительно. Для контроля учитывали члены до  $m = 7$ ; отличия траекторий при этом были незначительными.

Траектории определяли, интегрируя систему трех уравнений, записанных в параметрической форме в прямоугольных координатах  $(x, y, z)$ :

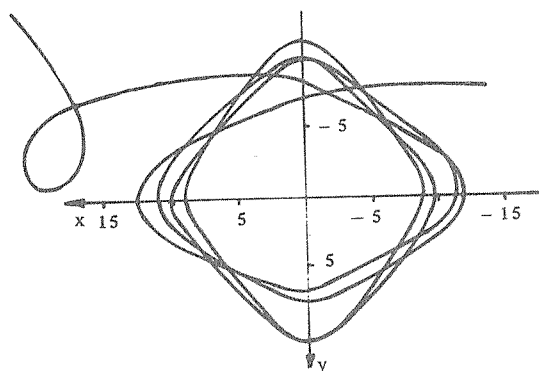
$$\begin{aligned} \ddot{x} &= a(\dot{y}H_z - \dot{z}H_y), \\ \ddot{y} &= a(\dot{z}H_x - \dot{x}H_z), \\ \ddot{z} &= a(\dot{x}H_y - \dot{y}H_x). \end{aligned} \quad (2)$$

Коэффициент  $a$  в уравнениях (2) определяется энергией электронов, а начальные условия — координатами и углами вылета их из инжектора. Составляющие поля  $H_x$  и  $H_y$  выражали через  $H_\theta$  и  $H_r$ , величины  $H_r$ ,  $H_\theta$ ,  $H_z$  представляли в виде разложений по степеням  $z/r$  до  $(z/r)^3$  включительно. Входящие в эти разложения производные от  $H_i(r, \theta)$  по  $r$  и  $\theta$  до третьего порядка включительно получали аналитически, дифференцируя выражение (1). На первом этапе расчеты вели без учета вертикального движения ( $z = 0$ ). В результате численных расчетов большого числа вариантов, отличающихся координатами инжектора и углом вылета электронов, найдены оптимальные траектории инжекции.

\* Московский радиотехнический институт АН СССР.



Р и с. 1. Схема внешней инъекции. Показаны два сектора магнитной системы: А — точка расположения инжектора; 1 — орбита инъекции; 2,3,4 — траектории частиц с различными значениями угла вылета из инжектора.



Р и с. 2. Одна из расчетных траекторий. Циркуляция частиц в течение четырех оборотов.

На рис. 1 схематически показаны два сектора магнитной системы ИЦУ. Инжектор расположен в точке А. Форма траекторий существенно зависит как от координат этой точки, так и от направления начальной скорости электрона. На рис. 1 показана орбита инъекции (обозначена цифрой 1) и расчетные траектории (2,3,4) для трех различных значений угла вылета из точки А. При изменении угла вылета на несколько градусов угол траектории с орбитой сначала уменьшается (от траектории 2 к траектории 3), а затем снова увеличивается (траектория 4). Благоприятным обстоятельством для ввода электронов на орбиту в середине магнитного сектора является то, что огибающая радиальных колебаний на этом азимуте имеет максимум. Расчеты показали также, что в этой точке происходит фокусировка траекторий с разбросом значений угла вылета в диапазоне  $\pm 4^\circ$ .

Для точного ввода электронов на орбиту необходима тонкая коррекция траекторий на их конечном участке. Применение электростатического инфлектора нежелательно, поэтому был рассмотрен вариант с локальным изменением магнитного поля в одном из секторов. Для этого при расчете в выражение (1) вводили дополнительный множитель  $B(r, \theta)$ :

$$B(r, \theta) = \begin{cases} 1 & \text{при } r > R \\ B_0 & \text{при } r \leq R, \end{cases} \quad -\pi/4 \leq \theta \leq 3\pi/4, \quad (3)$$

где  $0 < B_0 < 1$ , а  $R$  меньше радиуса орбиты инжекции. Создать такое возмущение можно, уложив дополнительные проводники с током в пазы на полюсах соответствующего сектора (устройство магнита см. в /2/). Расчеты позволили найти такое  $B_0$ , при котором частица совершает 4—5 оборотов вблизи орбиты инжекции (рис. 2). При этом возможен захват без электростатического инфлектора, если использовать достаточно большое ускоряющее напряжение.

Учет вертикального движения показал, что при вертикальной полуапертуре вакуумной камеры  $\sim 1$  см допустимо начальное отклонение электронов в точке  $A$  по вертикали  $\pm 0,2$  см и по вертикальному углу  $\pm 0,01$  рад. Это значит, что для эффективного использования инжектируемых электронов пучок из инжектора следует хорошо сфокусировать и обеспечить малую его угловую расходимость.

Описанный вариант внешней инжекции не является единственным и окончательно определенным. В частности, дальнейшие расчеты целесообразно направить на подбор такого значения показателя поля  $n_0$  в окрестности орбиты инжекции, при котором возможно большее число оборотов электронов вблизи орбиты. При этом можно сначала промоделировать область ослабленного магнитного поля, реальные границы которой будут протяженными, а не резкими, как их описывают условия (3).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Канунников В. Н., Михалев П. С. ЖТФ, 46, 2586 (1976).
2. Канунников В. Н. и др. Труды V Всес. совещ. по ускорителям, 2, 74, М., Наука, 1977.
3. Канунников В. Н. и др. Труды VI Всес. совещ. по ускорителям, ОИЯИ, Дубна, 1979, с. 319.
4. Канунников В. Н. и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 3, 33 (1981).
5. Канунников В. Н. ЖТФ, 52, 1825 (1982).
6. Гладышев В. А. и др. Труды межд. конф. по ускорителям. М., Атомиздат, 1964, с. 658.

Поступила в редакцию 9 декабря 1985 г.