

94-261



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

P9-94-261

С.Б.Ворожцов, В.П.Дмитриевский, Г.А.Карамышева

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТРЕХКАСКАДНОГО
УСКОРИТЕЛЯ ТИПА TRITRON

1994

Введение

В данной работе рассматривается одна из возможных схем расчета структуры ускорительного комплекса, состоящего из трех ускоряющих ступеней типа TRITRON [1]. Ускоритель с разделенными орбитами может оказаться полезным при решении проблемы создания сильноточных протонных ускорителей на средние энергии (до 1 ГэВ). Схема базируется на расчете главной (спиральной) траектории заряженной частицы. При этом подразумевается наличие поперечной и продольной устойчивости для заданного эмиттанта пучка. Работа комплекса на одной частоте ускоряющего поля, которое создается сверхпроводящими резонаторами в промежутках между поворотными магнитами, позволяет изменять кратность ускорения на различных ступенях. Продольный фазовый объем в этом случае будет определяться наивысшей кратностью ускорения комплекса, поперечный - регулируемые градиентами магнитного поля в каждом канале. Идентичность резонаторов определяется одинаковыми величинами разделения орбит и числа оборотов. Комплекс обеспечивает увеличение энергии протонов от 20 до 760 МэВ.

Методика расчета структуры ускорителя

Один из способов расстановки и выбора параметров представлен У.Тринксом [2]. В основе лежит следующее равенство:

$$f_{rf} = h * f_0 = h * \frac{v}{2 \pi r} = \text{const}$$

где f_{rf} - частота ВЧ-генератора;

h - номер гармоники;

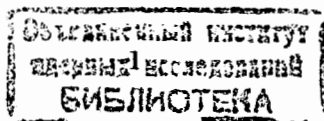
f_0 - частота обращения частицы;

v - скорость частицы;

r - средний радиус орбиты.

То есть энергии и радиусу соответствует определенная частота обращения частиц, которая должна быть кратной частоте ускоряющего поля.

Ускоряющее напряжение и количество ускорительных промежутков определяют набор энергии на обороте и, следовательно, конечную энергию каскада. Энергия, в свою очередь, определяет радиусы кривизны орбит $\rho(j)$, (j - номер оборота). Для обеспечения изохронизма движения необходим линейный рост длины периода A между последовательными резонаторами от периода α к периоду. Исходя из этих соображений для выбора параметров структуры ускорителя прежде всего следует задаться требуемыми энергиями, соответствующими им радиусами кривизны,



технологически доступными ускорительными напряжениями, необходимым количеством периодов. Далее выбирается прирост радиуса - $\delta r = 0.1 \text{ м}$, который должен быть достаточно большим для обеспечения большей апертуры ускорителя и по возможности маленьким - для обеспечения большей плотности оборотов. Прирост радиуса определяет прирост длины периода δa , так как δr и δa связаны следующим соотношением:

$$\delta a = 2 * \frac{\delta r}{N} * \text{tg} \left(\frac{\alpha}{2} \right),$$

где N - количество периодов;
 α - угол поворота магнита.

Далее следует расположить магниты и резонаторы так, чтобы обеспечить постоянный прирост длин периодов. Для этого резонаторы располагаются на постоянном для данного оборота расстоянии $d1(j)$ от магнита. Прирост длины периода обеспечивается приростом расстояния $d2(j,i)$ (i - номер периода) от резонатора до следующего магнита. Полная длина свободного промежутка $d = d1 + d2$ меняется от оборота к обороту из-за изменения радиуса кривизны δr , длины ускорительного промежутка δg и прироста периода δa . Таким образом, изменение длины свободного промежутка от оборота к обороту определяется по следующей формуле:

$$\delta d = N * \delta a - (\delta g + \delta r * \alpha)$$

На последнем, двенадцатом, обороте выбираем $d2(12,1) = d1(12) = 180 \text{ мм}$ (из технологических соображений).

Отсюда можно получить и все остальные свободные промежутки:

$$d1(j) = d1(12) + (12 - j) * \left[\frac{\delta g}{2} + (\delta r - \delta r) * \text{tg} \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right],$$

$$d2(i,j) = d1(j) + (i - 1) * \delta a.$$

Следует заметить, что при переходе от обороту к обороту возникают следующие неточности:

1. Из-за прироста радиуса кривизны δr длина периода первой ячейки нового оборота уменьшится на $\delta r * (\alpha - 2 \text{tg}(\alpha/2))$ по сравнению с постоянным приростом. В целом этот эффект пренебрежимо мал.

2. Если убрать последний резонатор для установки инжекционного канала, то отсутствие увеличения скорости в последнем периоде на величину $dv = (v * (dr/r)) / N$ вызовет фазовый сдвиг:

$$d\phi = \frac{2\pi h}{N} \frac{dv}{v} = \left(2\pi h \frac{dr}{r} \right) / N^2.$$

3. Изменение напряжения от оборота к обороту также вызывает сдвиг центральной фазы и, следовательно, изменение продольного движения банча (изменение $dU/U \approx 0.05$ вызовет $d\phi \approx 5^\circ$, что пренебрежимо мало).

Таким образом, полностью задается структура ускорителя, удовлетворяющая требованиям, предъявляемым к ускорителю типа TRITRON.

Анализ структуры комплекса

Расчитанные по такому алгоритму три ступени комплекса имеют следующие характеристики.

На рис. 1 показан рост радиусов кривизны магнитов в зависимости от номера оборота для трех ступеней. На рис. 2 представлены изменения длин свободных промежутков: $d1$ (рис.2а) - в зависимости от номера оборота и $d2$ (рис.2б) - в зависимости от номера периода для последнего оборота второй ступени комплекса. Цифры 1,2,3 соответствуют различным ступеням комплекса.

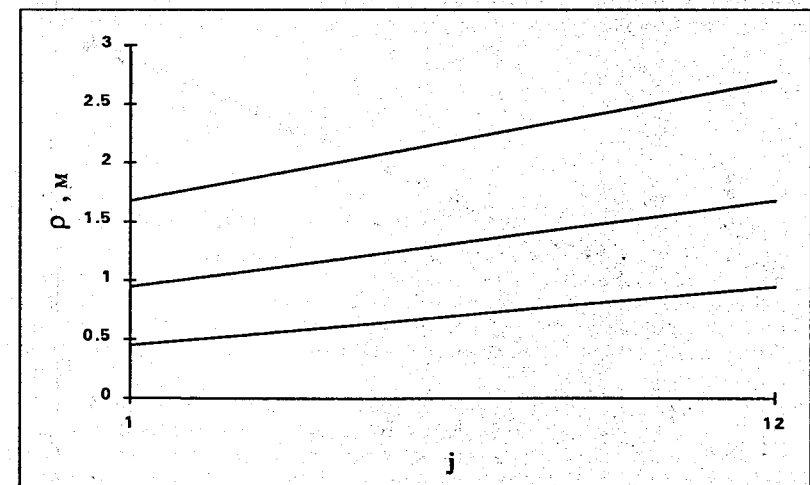


Рис.1. Зависимость радиуса кривизны от номера оборота

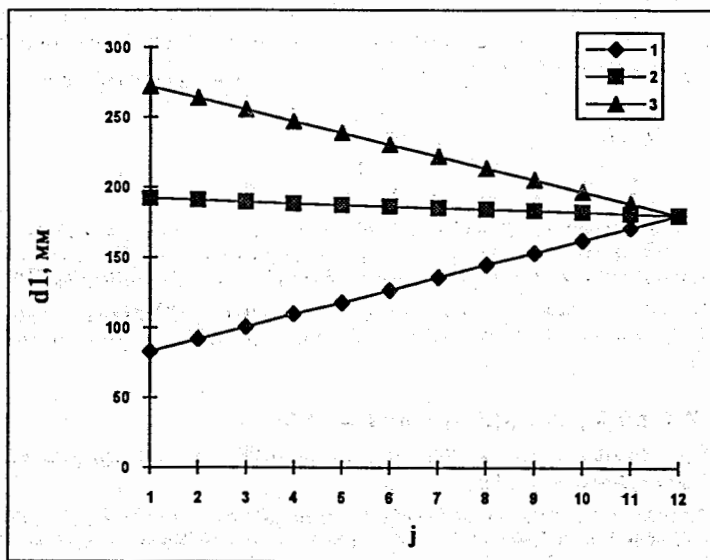


Рис.2а. Длина промежутка d1 в зависимости от номера оборота

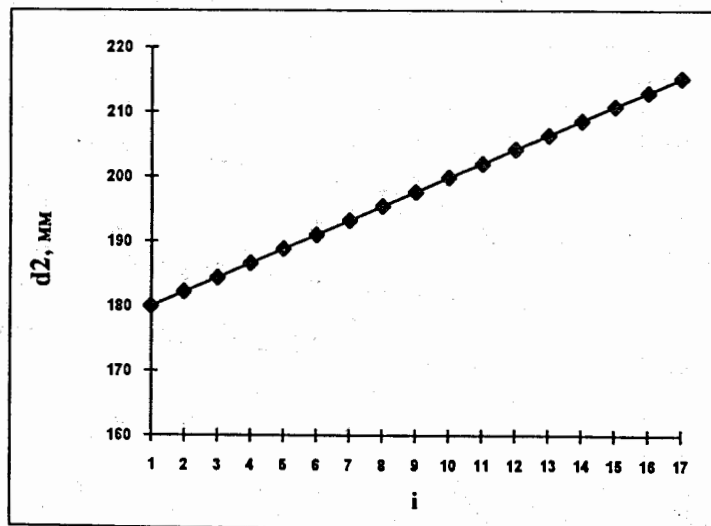


Рис.2б. Длина промежутка d2 в зависимости от номера периода

Параметры, полученные при расчетах структуры и динамики ускорительного комплекса, даны в таблице.

Таблица. Параметры комплекса

Параметры	1-я ступень	2-я ступень	3-я ступень
Тип ускоряемых частиц	протоны	протоны	протоны
Энергия инж. пучка, МэВ	20	122	349
Энергия вывод. пучка, МэВ	122	349	760
Число оборотов	12	12	12
Радиус первого оборота, м	1.0	2.58	5.51
Радиус вывода, м	2.2	3.78	6.71
Метод вывода	ускорением	ускорением	ускорением
Разделение орбит, м	0.1	0.1	0.1
Эффективность вывода, %	100	100	100
Число секторов	10	17	32
Макс. магн. поле магн. каналов, Т	1.75	1.8	1.75
Число дуантов (резонаторов)	9	16	31
Напряжение на дуанте, кВ	0.8+1.5	0.8+1.5	0.8+1.5
Набор энергии за оборот, МэВ	15	30	58
Номер гармоники	8	10	15
Частота ВЧ-генератора, МГц	90	90	90
Длина ускорит. промежутка, м	0.1+0.2	0.1+0.2	0.1+0.2

Так как конечный радиус меньшего ускорителя всегда меньше начального радиуса следующей ускорительной ступени, работа возможна на различных гармониках. В представленном комплексе гармоники ступеней соответственно равны: 8, 10, 15 и находятся в примерном соотношении с радиусами:

$$\frac{h1}{r1} = \frac{h2}{r2} = \frac{h3}{r3}$$

Продольное движение частиц

Для анализа движения частиц применялась теория продольного движения в TRITRON, изложенная в работе [3]. Расчеты производились без учета поперечного движения частиц. При переходе частиц из одной ступени комплекса в другую начальные значения параметров последующей ступени принимались равными конечным значениям соответствующих параметров предыдущей ступени.

На рис.3 представлена зависимость фазы частиц от номера оборота в ускорителе. Видно, что ее значение колеблется в диапазоне от 0 до $\pi/2$, что удовлетворяет условию стабильности движения. Наличие либо отсутствие последнего резонатора не оказывает существенного влияния на характер зависимости.

На рис.4 дана зависимость энергии частиц от номера оборота. Видно, что комплекс ускоряет протоны от 22 МэВ до 755 МэВ.

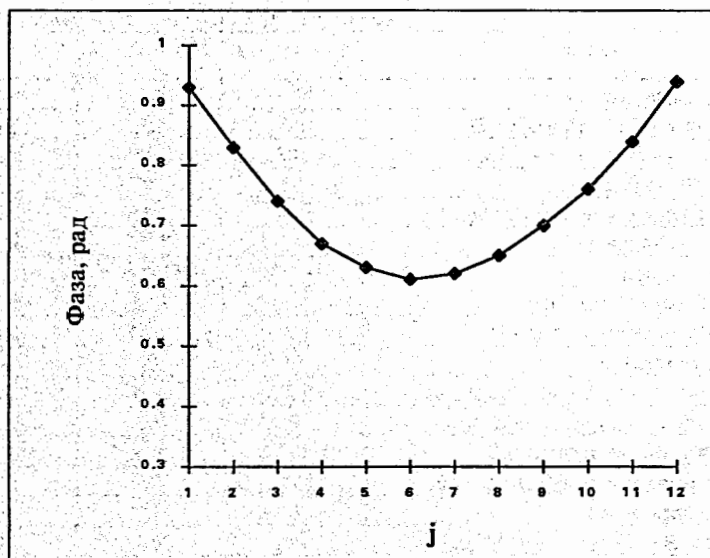


Рис.3. Зависимость фазы частиц от номера оборота (2-я ступень)

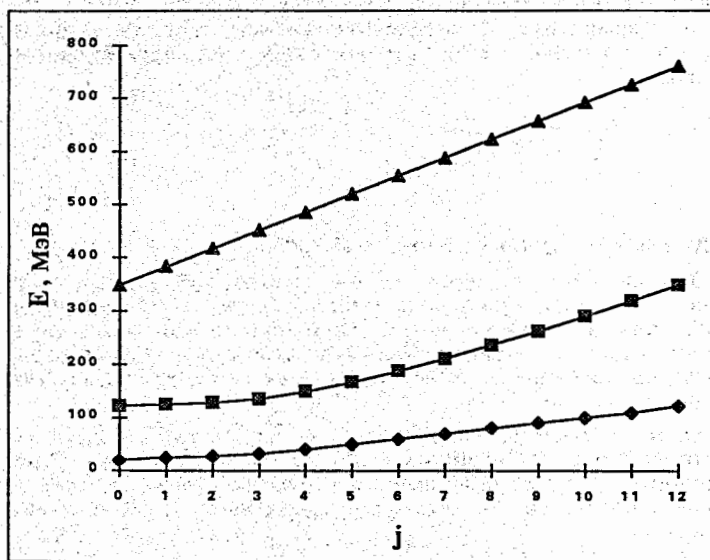


Рис.4. Зависимость энергии частиц от номера оборота

Несколько изменяя начальные условия, а именно энергию и ВЧ-фазу инжектируемого пучка, можно получать различные конечные энергии.

Заключение

Вышеописанная методика расчета параметров позволяет быстро подобрать подходящую расстановку магнитов и резонаторов и проверить работоспособность полученного ускорителя. Рассчитанный таким способом комплекс позволяет ускорять протоны от 20МэВ до 760МэВ, при этом предполагается, что схема обладает всеми достоинствами ускорителя типа TRITRON.

Литература

1. Trinks U. - The Superconducting Separated-Orbit Cyclotron Tritron. In Proc. of 13-th International Conference on Cyclotrons and their Applications, July 6-10, 1992, Vancouver, Canada, World Scientific, Singapore - New Jersey - London - Hong Kong, p.693.
2. Trinks U. - Private communication.
3. Trinks U. - Longitudinal particle dynamics in the Tritron. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A306 (1991), p.27-35.

Рукопись поступила в издательский отдел
12 июля 1994 года.