

ПРОВОЛОЧНЫЕ КОАКСИАЛЬНЫЕ РЕЗОНАТОРЫ ДЛЯ СИНХРОТРОНОВ

Б. А. СОЛНЦЕВ

(Представлено научным семинаром физико-технического факультета)

В синхротронах с энергией ускоренных электронов 15—30 Мэв в качестве ускоряющего устройства удобно использовать четвертьволновые коаксиальные резонаторы, проводящие поверхности которых образованы медными проволоками, закрепленными на диэлектрических кольцах (рис. 1). Резонаторы такого типа впервые были использованы Говардом и Бирнсом в синхротронах на 8 и 16 Мэв [1], однако дальнейшего развития они не получили. Между тем резонансные свойства подобных резонаторов можно значительно улучшить.

Вследствие изгиба резонатора длины отдельных проволок, образующих его проводящие поверхности, отличаются друг от друга, и каждая пара проволок резонирует на своей собственной частоте. Резонатор такого типа можно рассматривать как систему связанных двухпроводных линий, каждая из которых эквивалентна параллельному колебательному контуру. Свойства системы связанных контуров характеризуются полосой пропускания—величиной, обратной добротности системы. Известно, что полоса пропускания такой системы тем шире, чем сильнее разница в собственных частотах контуров, образующих ее. Поэтому разница в длинах отдельных проволок снижает добротность проволочного коаксиального резонатора. Выравнивание электрических длин проволок должно привести к повышению добротности резонатора.

Возможны два способа компенсации электрических длин. Первый способ состоит в изменении ширины диэлектрических колец по периметру резонатора.

Собственная длина волны каждой из двухпроводных линий, образующих резонатор,

$$\lambda = 4\xi, \quad \xi = \sqrt{1 + \frac{P}{S}(\epsilon - 1)}, \quad (1)$$

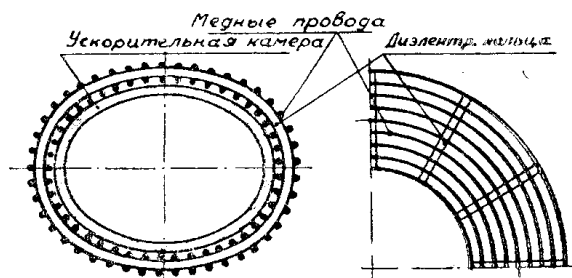


Рис. 1

де l — длина линии,
 ϵ — диэлектрическая проницаемость материала колец.
 Величины P и S указаны на рис. 2.

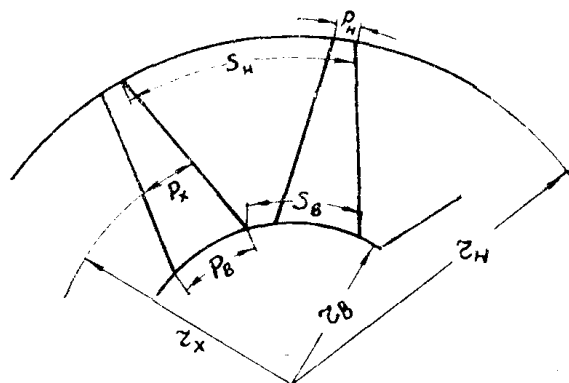


Рис. 2

Можно так подобрать форму колец, что собственные частоты всех линий окажутся равными. Форма колец в этом случае описывается уравнением

$$\frac{\left(\frac{r_x}{r_b}\right)^2 - 1}{\frac{r_x}{r_b}(\epsilon - 1)} \cdot S_b + p_x \frac{r_x}{r_b} = p_b. \quad (2)$$

Все размеры показаны на рис. 2. Из рис. 2 видно, что отношение $\frac{S_b}{P_b}$ не может быть меньше 1, а величина a_n должна быть больше 0. Следовательно, условие применимости этого способа имеет вид:

$$\epsilon > \left(\frac{r_n}{r_b}\right)^2. \quad (3)$$

Чем больше разница между наружным и внутренним радиусами камеры, тем выше должна быть диэлектрическая проницаемость материала колец.

Второй способ заключается в том, что геометрическая длина всех проволок, образующих резонатор, делается одинаковой. Условие применимости такого метода компенсации, вытекающее из построения на рис. 3, следующее:

$$r_b > \frac{r}{2}. \quad (4)$$

Внутренний радиус камеры r_b должен быть больше половины наружного.

Второй способ, хотя и приводит к появлению радиальной составляющей ускоряющего электрического поля (рис. 3), но дает лучшие результаты, так как не требует увеличения количества вводимого в резонатор диэлектрика.

При разработке высокочастотной системы синхротрона весьма важно знать резонансное сопротивление и добротность резонатора, который предполагается использовать.

Несмотря на то, что теория полых резонаторов достаточно хорошо разработана, практических формул для определения этих величин резона-

торов рассматриваемого типа не имеется. Предлагаемые ниже формулы позволяют обойтись без громоздких вычислений, неизбежных при обычном расчете.

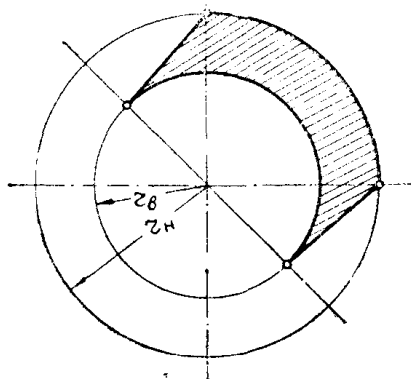


Рис. 3

Резонансное сопротивление резонатора в виде четвертьволнового отрезка длиной линии определяется выражением [2]

$$Z_p = \frac{8Z_o^2 f \epsilon}{R \cdot c}, \quad (5)$$

где Z_o — волновое сопротивление линии в ом,
 f — частота в гц,
 R — сопротивление линии на единицу длины в ом/м,
 c — скорость света в м/сек.

Не имея точных данных о распределении тока по поверхности проводов, образующих стенки резонатора, будем считать, что ток равномерно распределен по половине поверхности проводников, обращенной внутрь резонатора в слое, толщина которого равна глубине погружения токов высокой частоты в толщу металла σ (рис. 4). Тогда сопротивление линии на единицу длины будет равно:

$$R = \frac{2\rho}{\sigma \pi r N}, \quad (6)$$

где ρ — удельное сопротивление материала проводников в ом/м,
 r — радиус поперечного сечения проводников в м,
 N — общее число проводников на каждой поверхности резонатора,
 σ — глубина погружения токов высокой частоты в толщину металла в м.

Для определения волнового сопротивления линии можно воспользоваться известным соотношением: $Z_o = \frac{30}{C_o \sqrt{\epsilon}}$.

Здесь C_o — погонная емкость линии при отсутствии диэлектрика. Расчет погонной емкости коаксиальной линии, проводящие поверхности которой образованы большим числом проводников, является весьма трудной задачей. На основании опыта нами получена эмпирическая формула, дающая хорошее приближение в рассматриваемых пределах

$$C_o = \frac{31 N^2 (a+b)^2}{(d/r)^2}. \quad (7)$$

В этой формуле a и b — полуоси наружного сечения ускорительной камеры в m ,

d — расстояние между центрами проводов, образующих наружную и внутреннюю поверхности резонатора (рис. 4).

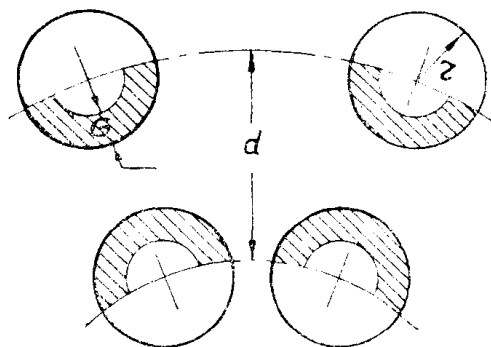


Рис. 4

После подстановки соответствующих значений получим:

$$Z_p = 3,9 \cdot 10^{-8} \frac{f \cdot d \cdot N^{1/3}}{(a+b)^{1/3} \xi} \quad (8)$$

В случае, когда проводящие поверхности резонатора образованы медными проволоками $\rho = 1,74 \cdot 10^{-3} \frac{\text{ом}}{m}$ и $\sigma = \frac{6,62 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{f}} m$, формула (8) принимает вид:

$$Z_p = 1,5 \cdot 10^{-3} \frac{d f^{1/2} N^{1/3}}{(a+b)^{1/3} \xi} \quad (9)$$

Резонансное сопротивление увеличивается с ростом расстояния между внутренней и наружной поверхностями коаксиальной линии и не зависит от радиуса проводов, образующих поверхности резонатора. Количество проводов слабо влияет на качество резонатора.

На основании формулы (9) можно определить и добротность резонатора Q . Известно, что

$$Q = \frac{\pi Z_p}{4Z_0} \quad (10)$$

Производя соответствующую замену, получаем выражение добротности резонатора в виде

$$Q = \frac{\pi \sigma d^{1/2} r^{1/2} N^{2/3}}{\rho (a+b)^{2/3}} \quad (11)$$

Добротность резонатора, образованного медными проводами:

$$Q = 0,12 \frac{f^{1/2} d^{1/2} r^{1/2} N^{2/3}}{(a+b)^{2/3}} \quad (12)$$

Для синхротрона на 20 Мэв было изготовлено 3 проволочных резонатора. Для всех резонаторов $d = 3 \cdot 10^{-3} m$; $r = 2 \cdot 10^{-4} m$; $N = 70$; $a+b = 7,6 \cdot 10^{-2} m$; $f = 365 \text{ мГц}$.

Значение добротности, рассчитанное по формуле (12), составляет 168. Добротность, измеренная по методу расстройки частоты, у резонатора без компенсации длин оказалась равной 128, у резонатора с диэлектрической компенсацией—134 и у резонатора с электрической компенсацией—141.

Как и следовало ожидать, наибольшей добротностью обладает резонатор с геометрической компенсацией. Величина добротности, получаемая из формулы (12), хорошо совпадает с действительным значением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Coward F.K., Barnes D. E., *Experimental 8 Mev Synchrotron for Electron Acceleration* Nature, № 4012, 158, p. 413, 1946.
 2. Справочник по радиотехнике под редакцией Б. А. Смиренина. Госэнергоиздат, 1950.
-