

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДОВ В КАЧЕСТВЕ УСКОРЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА СИНХРОТРОНА

Б. А. СОЛНЦЕВ

(Представлено научным семинаром физико-технического факультета)

В электронных синхротронах, имеющих электромагнит кольцевого типа, в качестве ускоряющего устройства обычно применяют коаксиальные резонаторы. Резонаторы такого типа помещаются в междупольном пространстве электромагнита и поэтому не могут иметь достаточно большое расстояние между внутренней и наружной проводящими поверхностями. Расстояние это всегда значительно меньше оптимального, и добротность резонаторов получается ниже, чем у обычных коаксиальных резонаторов.

При настройке высокочастотной системы синхротрона весьма важно иметь возможность изменять частоту ускоряющего электрического поля, так как во многих случаях максимум интенсивности излучения получается при частоте электрического поля, отличающейся от расчетной. Коаксиальные резонаторы, предназначенные для использования в синхротроне, трудно поддаются перестройке по частоте, возможные пределы изменения частоты таких резонаторов едва достигают 2—3%.

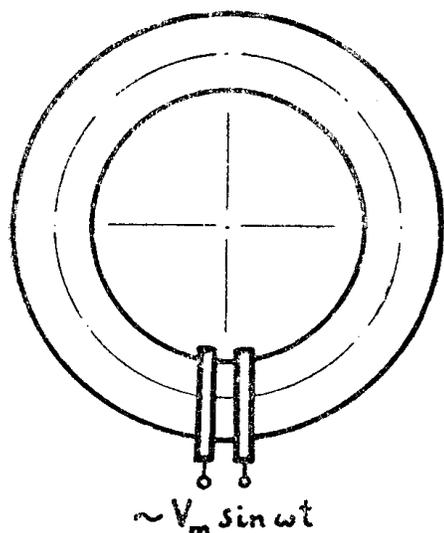


Рис. 1

Значительно проще и удобнее коаксиальных резонаторов является ускоряющее устройство в виде двух кольцевых электродов, охватывающих ускорительную камеру вдоль щели в ее проводящем покрытии, между которыми создается ускоряющее электрическое поле. Такое устройство изображено на рис. 1.

В настоящее время по аналогии с потенциальным электрическим полем принято считать, что процесс ускорения в поле, образованном подобными электродами, невозможен.

Для рассмотрения этого вопроса представим себе электрон, обращающийся в постоянном магнитном поле по круговой орбите радиуса r_0 . Пусть электрон проходит ускоряющий промежуток между электродами мгновенно, в момент, когда фаза электрического поля равна φ_0 . Будем считать, что напряженность электрического поля вне ускоряющего промежутка постоянна вдоль

орбиты. Выражение для напряженности электрического поля вне ускоряющего промежутка в этом случае имеет вид:

$$E = \frac{V_m}{2\pi r_0} \sin(\omega t - \varphi_s), \quad (1)$$

где V_m — амплитуда ускоряющего напряжения на зазоре между электродами,

ω — угловая частота электрического поля.

Прирост энергии электрона за один оборот

$$\delta A = eV_m \sin \varphi_s - \int_0^{2\pi r} e \frac{V_m}{2\pi r_0} \sin(\omega t - \varphi_s) dl. \quad (2)$$

Здесь e — заряд электрона,

l — пройденный электроном путь.

Путь l пропорционален скорости электрона v , следовательно $dl = v dt$ и

$$\delta A = eV_m \sin \varphi_s - \int_0^{kT} \frac{eV_m v}{2\pi r_0} \sin(\omega t - \varphi_s) dt, \quad (3)$$

где k — коэффициент кратности частоты электрического поля по отношению к частоте обращения электрона,

T — период колебаний электрического поля.

В результате интегрирования получаем

$$\delta A = eV_m \sin \varphi_s. \quad (4)$$

Таким образом, полное приращение энергии за оборот равно приращению энергии в ускоряющем зазоре и не зависит от сил, действующих на электрон при его движении по орбите. После выхода из ускоряющего зазора на первой четверти пути электрон тормозится, на следующих двух четвертях пути он испытывает ускорение и на последней четверти пути снова тормозится (при $k=1$), причем количество отданной и количество полученной электроном энергии оказывается равным. Если магнитное поле растет во времени, для δA получим такое же выражение, с той лишь разницей, что φ_s будет изменяться в соответствии с изменением магнитного поля. В действительности напряженность электрического поля нельзя считать одинаковой в каждой точке, лежащей на орбите. В результате этого электрон за время между двумя последовательными прохождениями ускоряющего промежутка теряет энергию, однако, как показал опыт, потеря энергии невелика. Напряжение на ускоряющем зазоре при использовании электродов приходится увеличивать не больше, чем на 20–30%, по сравнению с тем напряжением, которое необходимо иметь в случае коаксиальных резонаторов.

Если принять во внимание наличие проводящего покрытия камеры, то конфигурация электрического поля внутри камеры не будет отличаться от формы поля, создаваемого коаксиальными резонаторами, — проводящее покрытие экранирует орбиту электронов от обратного поля электродов.

При строгом рассмотрении потенциалы участков проводящего покрытия, расположенных под электродами, нельзя считать одинаковыми, так как покрытие представляет некоторую индуктивность. На рис. 2 представлена эквивалентная схема ускоряющего устройства с учетом проводящего покрытия камеры. На рис. 2 L_k — индуктивность покрытия камеры,

R_k —омическое сопротивление покрытия, C_k —емкость зазора в покрытии, $C_э$ —емкость между кольцевым электродом и покрытием.

Из рассмотрения эквивалентной схемы видно, что при соблюдении определенных условий в данной схеме возможен резонанс напряжений. Известно, что в случае последовательного резонанса напряжение на емко-

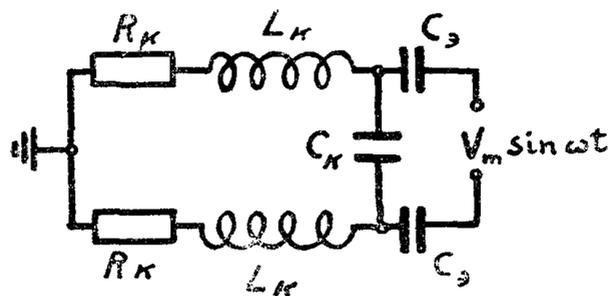


Рис. 2

сти и на индуктивности в Q раз превышает напряжение источника питания, где Q —добротность системы. Следовательно, при надлежащем выборе емкости $C_э$ можно ожидать превышения напряжения на зазоре в проводящем покрытии камеры по сравнению с напряжением, подаваемым на электроды. Условие резонанса для рассматриваемого случая запишется в виде

$$\frac{1}{\omega C_э} = \omega L_k - \frac{1}{2\omega C_k}. \quad (5)$$

Для выполнения этого условия индуктивное сопротивление проводящего покрытия должно быть больше емкостного сопротивления зазора в нем. Такое соотношение между L_k и C_k в действительности имеет место. Емкость же между электродом и покрытием может регулироваться в широких пределах изменением ширины электродов.

В синхротронах на энергию 15—25 Мэв индуктивность покрытия составляет десятые доли мкГн, а емкость зазора в нем—несколько мкмкф. Активное сопротивление достигает сотни ом. Определив добротность всей системы по формуле

$$Q = \frac{2\omega L_k - \frac{1}{\omega C_k}}{2R_k},$$

убеждаемся, что она не превышает единицы, поэтому повысить напряжение за счет последовательного резонанса в синхротронах на 15—25 Мэв не представляется возможным. В синхротронах на большие энергии L_k и R_k растут приблизительно пропорционально увеличению радиуса орбиты. Угловая же частота электрического поля обратно пропорциональна радиусу. Следовательно, и в синхротронах с энергией электронов выше 25 Мэв добротность ускоряющей системы меньше единицы. Таким образом, влияние проводящего покрытия можно не учитывать во всех случаях.

Кольцевые электроды для высокочастотного генератора представляют емкостную нагрузку. Между тем генератор отдает максимальную мощность в том случае, когда нагрузка носит активный характер. Поэтому реактивность ускоряющего устройства необходимо компенсировать реактивностью противоположного знака. Наиболее часто в таких случаях используют реактивные шлейфы, подключаемые к питающему фидеру вблизи нагрузки. В данном же случае удобнее параллельно емкости электродов включить отрезок

двухпроводной линии соответствующей длины, как это изображено на рис. 3. Отрезок двухпроводной линии, нагруженной на емкость $\frac{C_3}{2}$, будет иметь активное сопротивление, если соблюдается соотношение

$$\frac{2}{\omega C_3} = Z_o \operatorname{tg} ml \quad (7)$$

в случае короткозамкнутой линии и

$$\frac{2}{\omega C_3} = Z_o \operatorname{ctg} ml \quad (8)$$

при разомкнутой линии.

Здесь Z_o —волновое сопротивление линии,

$m = \frac{2\pi}{\lambda}$ — фазовая постоянная,

λ —длина волны. Резонансное сопротивление ускоряющего устройства такого типа выражается формулой [1]

$$Z_p = \frac{8Z_o^2}{R\lambda}, \quad (9)$$

где R —активное сопротивление на единицу длины линии.

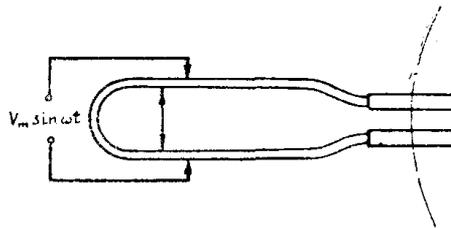


Рис. 3

Так как в случае использования электродов геометрические размеры ускоряющего устройства не ограничены величиной междуполосного пространства электромагнита, возможно соблюдение всех оптимальных условий, и резонансное сопротивление существенно выше, чем у коаксиальных резонаторов, применяемых в синхротронах.

Ускоряющее устройство в виде электродов легко поддается перестройке в широких пределах по частоте. Перестройка осуществляется простым перемещением короткозамыкающего мостика по длине линии.

Устройство рассматриваемого типа является симметричной системой и поэтому очень удобно в том случае, когда высокочастотный генератор собран по двухтактной схеме, так как не требует симметрирующих устройств. Согласование входного сопротивления устройства с питающим фидером производится перемещением места подключения фидера по длине линии. Наконец, такое устройство значительно проще в изготовлении, чем коаксиальный резонатор любой конструкции.

К числу недостатков нужно отнести заметное излучение электромагнитной энергии, но оно в значительной степени может быть ослаблено соответствующим экранированием.

Основные характеристики работы синхротрона при использовании в качестве ускоряющего устройства электродов ничем не отличаются от характеристик при использовании коаксиальных резонаторов, вместе с тем

напряжение на ускоряющем зазоре при одной и той же мощности, отдаваемой генератором в нагрузку, в случае использования электродов значительно выше.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Кинг, Г. Мимно, А. Уинг, Передающие линии, антенны и волноводы. Госэнергоиздат, 1948.
